

A13

Ultrashort-pulse source with controllable multiple-wavelength output

Patent Number: US6154310
 Publication date: 2000-11-28
 Inventor(s): GALVANAUSKAS ALMANTAS (US); WONG KA K (US); HARTER DONALD J (US)
 Applicant(s):: IMRA AMERICA INC (US)
 Requested Patent: DE19853669
 Application Number: US19970975679 19971121
 Priority Number(s): US19970975679 19971121
 IPC Classification: G02F1/37
 EC Classification: G02F1/313C, G02F1/313T, G02F1/39C
 EC Classification: G02F1/313C ; G02F1/313T ; G02F1/39C
 Equivalents: JP11284260

Abstract

A multiple-wavelength ultrashort-pulse laser system includes a laser generator producing ultrashort pulses at a fixed wavelength, and at least one and preferably a plurality of wavelength-conversion channels. Preferably, a fiber laser system is used for generating single-wavelength, ultrashort pulses. An optical split switch matrix directs the pulses from the laser generator into at least one of the wavelength conversion channels. An optical combining switch matrix is disposed downstream of the wavelength-conversion channels and combines outputs from separate wavelength-conversion channels into a single output channel. Preferably, waveguides formed in a ferroelectric substrate by titanium indiffusion (TI) and/or proton exchange (PE) form the wavelength-conversion channels and the splitting and combining matrices. Use of the waveguide allows efficient optical parametric generation to occur in the wavelength-conversion channels at pulse energies achievable with a mode-locked laser source. The multiple-wavelength laser system can replace a plurality of different, single-wavelength laser systems. One particular application for the system is a multi-photon microscope, where the ability to select the ultrashort-signal wavelength of the laser source accommodates any single fluorescent dye or several fluorescent dyes simultaneously. In its simplest form, the system can be used to convert the laser wavelength to a more favorable wavelength. For example, pulses generated at 1.55 μm by a mode-locked erbium fiber laser can be converted to 1.3 μm for use in optical coherence tomography or to 1.04-1.12 μm for amplification by a Ytterbium amplifier, allowing amplification of pulses which can be used in a display, printing or machining system.

Data supplied from the esp@cenet database - I2



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Off nl gungsschrift
10 DE 198 53 669 A 1

51 Int. Cl.⁶:
G 02 F 1/39
H 01 S 3/10

21 Aktenzeichen: 198 53 669.0
22 Anmeldetag: 20. 11. 98
43 Offenlegungstag: 27. 5. 99

DE 198 53 669 A 1

30 Unionspriorität:
975679 21. 11. 97 US

71 Anmelder:
IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich. 48105, US

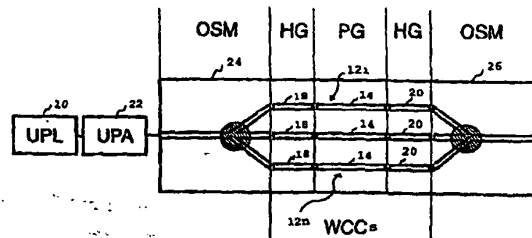
74 Vertreter:
Tiedtke, Bühling, Kinne & Partner, 80336 München

72 Erfinder:
Galvanauskas, Almantas, Dr., Ann Arbor, Mich., US;
Wong, Ka K., Dr., Ann Arbor, Mich., US; Harter,
Donald J., Dr., Ann Arbor, Mich., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Ultrakurzimpulsquelle mit steuerbarer Mehrfachwellenlängenausgabe

57 Ein Mehrfachwellenlängen-Ultrakurzimpuls-Lasersystem weist eine Ultrakurzimpulse einer festen Wellenlänge erzeugende Laserquelle (10) und zumindest eine bzw. vorzugsweise eine Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen (12₁-12_n) auf. Das Faserlasersystem wird bevorzugt zur Erzeugung von Ultrakurzimpulsen einer einzelnen Wellenlänge verwendet. Eine optische Trennschaltermatrix (24) richtet die Impulse der Laserquelle in zumindest einen der Wellenlängenumwandlungskanäle (12₁-12_n). Eine optische Verbindungsschaltermatrix (26) wird oberhalb der Wellenlängenumwandlungskanäle (12₁-12_n) angeordnet und verbindet die Ausgaben der unterschiedlichen Wellenlängenumwandlungskanäle (12₁-12_n) in einem einzelnen Ausgabekanal. In einem ferroelektrischen Substrat durch Titaneindiffusion (TI) bzw. Protonaustausch (PE) ausgebildete Wellenleiter bilden vorzugsweise die Wellenleiterumwandlungskanäle (12₁-12_n) und die Trennungs- und Verbindungsmatrizen (24, 26). Die Verwendung des Wellenleiters erlaubt das Auftreten einer wirksamen optischen parametrischen Erzeugung (14) in den Wellenlängenumwandlungskanälen (12₁-12_n) bei Impulsenergien, die über eine Festmodenlaserquelle verfügbar sind. Das Mehrfachwellenlängen-Lasersystem kann eine Vielzahl von verschiedenen Einzelwellenlängen-Lasersystemen ersetzen. Eine besondere Anwendung des Systems ist ein Multiphotonenmikroskop, bei dem die Fähigkeit, die Ultrakurzsignalwellenlänge der Laserquelle zu wählen, einen beliebigen ...



DE 198 53 669 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft allgemein ein Gerät und Verfahren zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse bei einer Vielzahl optischer Wellenlängen und insbesondere ein Gerät und Verfahren, welches optische Fasern und optische Wellenleiter zur Erzeugung und Steuerung derartiger optischer Impulse verwendet. Der Begriff "Ultrakurz" bezieht sich hier allgemein auf einen Zeitbereich zwischen ungefähr 10^{-15} s (Femtosekunden) und 10^{-12} s (Pikosekunden). Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren und Gerät zur optischen Abbildung bzw. optischen Abtastung unter Verwendung von gleichzeitig bei einer Vielzahl optischer Wellenlängen abgestrahlten ultrakurzen optischen Impulsen.

Es ist eine Vielzahl von Lasersystemen zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse bekannt. Unter praktischen Gesichtspunkten können diese Systeme allgemein in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden: Festkörperlaser-Systeme, welche auf der Verwendung eines Volumen-Laser-Verstärkungsmediums beruhen, und Faserlaser-Systeme, welche auf wellenleitenden faseroptischen Komponenten basieren. Aufgrund des ihnen eigenen Aufbaus weisen Faserlaser eine Anzahl von Grundeigenschaften auf, aufgrund denen sie wesentlich geeigneter für breit gestreute praktische Anwendungen sind. Es ist bekannt, daß Faserlaser kompakt, stabil sowie zuverlässig sind und diodengepumpt sein können. Aus vielen Gründen basiert derzeit die am weitesten entwickelte, für Ultrakurzimpuls-Faserlaser-Systeme geeignete Technik auf Erdotierten Fasern, womit Impulse mit einer Wellenlänge von ungefähr $1,55 \mu\text{m}$ ausgebbar sind. Erstens sind Er-dotierte Fasern unter den mit Seltenen Erden dotierten Fasern am besten entwickelt. Außerdem sind Diodenlaser zum Pumpen bzw. Anregen derartiger Fasern gut entwickelt.

Bezeichnenderweise erfordert die Erzeugung ultrakurzer Impulse eine Gestaltsteuerung bzw. Berücksichtigung beim Entwurf der Streuung im Laserhohlraum. Dies kann in einem kompakten Allfaserhohlraum lediglich bei Wellenlängen über $1,3 \mu\text{m}$ erreicht werden, wo die Streuung der optischen Faser entweder auf ein positives oder auf ein negatives Vorzeichen angepaßt sein kann. Eine Vielzahl praktischer Anwendungen für ultrakurze Impulse erfordert jedoch andere Betriebswellenlängen, beispielsweise entweder kürzere oder längere Wellenlängen. Für derartige Wellenlängen können derzeit Femtosekundenimpuls-Faseroszillatoren lediglich unter Verwendung von platzaufwendigen externen diskreten Komponenten wie Sätzen von Prismapaares zur Steuerung der Streuung innerhalb des Hohlraums entworfen werden.

Die Wellenlänge des Lasers ist für viele Anwendungen kritisch. Beispielsweise werden bei der in der zellulären Biologie verwendeten konfokalen Mikroskopie spezifische Farbstoffe an verschiedene Teile der Zelle angehängt und zur Untersuchung verschiedener Wirkungsweisen verwendet. Jeder dieser Farbstoffe wird durch ein entsprechendes Lichtspektrum zur Fluoreszenz angeregt. Daher werden für die konfokale Mikroskopie eine Vielzahl von Laser verschiedener Wellenlängen für verschiedene Farbstoffe verwendet. Ultraschnelle Laser mit kurzen Impulsen und hoher Spitzenleistung wurden unlängst zur Resonanzanregung von Farbstoffen verwendet, welche eine Zweiphotonenanregung erfordern. Das heißt, es wurden ultraschnelle Laser verwendet, damit eine ausreichende Photondichte im Brennpunkt eines Mikroskops zum Bewirken eines als Zweiphotonenabsorptionseffekt bezeichneten nichtlinearen optischen Effekts auftritt. Dieser Effekt wird zur Anregung von Farbstoffen bei einem Energieniveau verwendet, das der Hälfte der Wellenlänge jedes der beiden ursprünglichen

Photonen entspricht. Die Anzahl von verfügbaren Laser verschiedener Wellenlängen ist jedoch begrenzt. Demzufolge können derzeit nur wenige Farbstoffe zum Einsatz kommen. Daher könnte das Gebiet der Zweiphotonenmikroskopie in hohem Maße von einem Laser profitieren, der jeweils auf die verschiedenen Wellenlängen einer Anzahl verschiedener Farbstoffe abstimmbare ist. Die derzeit gültigen Anforderungen an einen Laser zur abtastenden Zweiphotonenmikroskopie lauten: 10–30 mW Durchschnittsleistung, 100–200 fs Impulsbreite und 50–100 MHz Wiederholrate.

Das allgemeine und gut bekannte Verfahren zur Ausdehnung des Wellenlängenbereichs irgendeines bestimmten Lasersystems besteht darin, nichtlineare optische Wechselwirkungen auszunutzen, wie beispielsweise optische Frequenzvervielfachung, Summen- oder Differenzfrequenzerzeugung und optische Parametervervielfachung.

Die Frequenzvervielfachung (bzw. Verzerrung bzw. Erzeugung von Oberwellen) ist lediglich zur Umwandlung eines optischen Signals zu einer höheren optischen Frequenz (kürzeren Wellenlänge) geeignet und kann keine abstimmbare oder Mehrfachwellenlängenausgabe bereitstellen. Die Summenfrequenz- und Differenzfrequenzerzeugung erlaubt die Umwandlung eines Signals sowohl zu höheren als auch zu niedrigeren optischen Frequenzen sowie eine Wellenlängengabestimmung, erfordert aber zumindest zwei gut synchronisierte optische Quellen bei zwei verschiedenen optischen Frequenzen. Daher kann keine der Wechselwirkungen alleine eine Mehrfachwellenlängen- oder wellenlängengabestimmbare Ausgabe von einer Einzelwellenlängensignalquelle bereitstellen.

Eine optische parametrische Wechselwirkung ist zur Bereitstellung einer abstimmbaren oder Mehrfachwellenlängenumwandlung unter Verwendung einer optischen Einzelwellenlängensignalquelle geeignet. Da die optische parametrische Umwandlung die Umwandlung eines optischen Signals lediglich zu niedrigeren optischen Frequenzen hin (längere Wellenlängen) ermöglicht, kann weiterhin durch Verbinden der parametrischen Wechselwirkung mit zumindest einer der vorstehend beschriebenen Wechselwirkungen eine beliebige optische Frequenz oberhalb oder unterhalb der Signalquellenfrequenz erzielt werden.

Der allgemeine Nachteil der parametrischen optischen Frequenzumwandlung liegt darin, daß zum Erhalt eines ausreichend hohen parametrischen Verstärkungsfaktors zur Verstärkung von spontanem Quantenverteilungsrauschen von mikroskopischen zu makroskopischen Pegeln und demzufolge zum Erhalt einer wirksamen Signal-Energie-Umwandlung hohe Spitzenleistungen und hohe Impulsenergien erforderlich sind. Es ist bekannt, daß die erforderlichen Energien deutlich über den Energien liegen, die direkt von einem typischen Festmoden- bzw. modenverriegelten Ultrakurzimpuls-Laseroszillator erzeugt werden können. Die derzeit besten bekannten Ergebnisse sind ein optischer parametrischer Erzeugungsschwellenwert (OPG) bzw. ein optischer parametrischer Erzeugungsschwellenwert bei $\approx 50 \text{ nJ}$ und ein OPG-Umwandlungswirkungsgrad von $\approx 40\%$ bei ungefähr 100 nJ , und sie wurden in periodisch gepolten Lithiumniobat-Volumenkristallen erzielt, vgl. Galvanauskas et al., "Fiber-laser-based femtosecond parametric generator in bulk periodically poled LiNbO_3 ", Optics Letters, Bd. 22, Nr. 2, Januar 1997. Zum Vergleich: Typische Femtosekunden-Festmodenimpulsenergien eines Faserlasers liegen in dem Bereich von 10 pJ bis 10 nJ (vgl. Fermann et al., "Environmentally stable Kerr-type mode-locked erbium fiber laser producing 360-fs pulses", Optics Letters, Bd. 19, Nr. 1, Januar 1997 und Fermann et al., "Generation of 10 nJ picosecond pulses from a modelocked fibre laser", Electronics Letters, Bd. 31, Nr. 3, Februar 1995) und die eines Festkörper-

lasers liegen im Bereich von bis zu ≈ 30 nJ (vgl. Pelouch et al., "Ti: sapphire-pumped, high repetition-rate femtosecond optical parametric oscillator", Optics Letters, Bd. 17, Nr. 15, August 1992).

Es ist bekannt, daß eine wirksame optische parametrische Wellenlängenumwandlung mit unverstärkten oder verstärkten Festmodenlaserpulsen erzielbar ist, indem ein nichtlinearer Kristall in einem separaten optischen Hohlraum in einer Weise angeordnet ist, die sicherstellt, daß die Pumpimpulse und die Signalimpulse das parametrische Verstärkungsmedium synchron durchlaufen, wie es beispielsweise dem vorstehend zitierten Aufsatz von Pelouch et al. entnommen werden kann. Da in diesem Fall die parametrische Wechselwirkung wiederholt auftritt, sind die niedrige einfach durchlaufene parametrische Verstärkung und demzufolge die niedrigen Impulsenergien der Festmodenoszillatoren ausreichend für eine wirksamen Umwandlung. Der wesentliche praktische Nachteil dieses Ansatzes liegt darin, daß eine derartige Bauart zwei präzise längenangepaßte optische Hohlräume erfordert, einen für einen Festmodenoszillator und einen weiteren für einen synchron gepumpten optischen Parameteroszillator (OPO). Demzufolge sind derartige OPO-Systeme komplex, groß und intern sehr empfindlich gegenüber den Umgebungsbedingungen (instabil). Weiterhin erfordert eine Wellenlängenabstimmung eines derartigen Systems eine mechanische Bewegung der Abstimmrichtungen wie Drehung oder Translation eines nichtlinearen Kristalls, Drehung von Hohlraumspiegeln usw., was mit schneller Wellenlängenabstimmung oder schnellem Wellenlängenschalten unvereinbar ist. Daher können OPOs nicht als praktische Ultrakurzimpulsquellen zur direkten Erzeugung von Mehrfachwellenlängen-Impulsen mit Festmodenoszillatorausgabe dienen.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und Gerät zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse einer veränderlichen oder einstellbaren optischen Wellenlänge aus einer einzelnen Quelle zu schaffen, welche ultrakurze optische Impulse einer festen optischen Wellenlänge bereitstellt.

Weiterhin soll ein Verfahren und Gerät zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse einer Vielzahl optischer Wellenlängen unter Verwendung einer einzelnen Quelle geschaffen werden, welche ultrakurze Impulse einer festen optischen Wellenlänge bereitstellt.

Weiterhin soll eine schnelle Steuerung der Ausgabe eines Lasersystems zur Auswahl unter einer Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen geschaffen werden.

Weiterhin soll eine Vielzahl von Wellenlängen bei der einzelnen Ausgabe des Lasersystems bereitgestellt werden, indem die Ausgabe getrennter Wellenlängenumwandlungskanäle in einem einzelnen Ausgabestrahle verbunden wird.

Weiterhin soll eine wirksame Mehrfachwellenlängen- oder wellenlängeneinstellbare Betriebsart bei relativ niedrigen Impulsenergien und -leistungen ermöglicht werden, die mit vorhandenen Ultrakurzimpuls-Lasersoszillatoren kompatibel ist. Zusätzlich soll ein derartiges System unter Verwendung stabiler, kompakter und zur Massenverarbeitung geeigneter Bestandteile geschaffen werden, damit ein kompaktes, stabiles, einfach herzustellendes und kostengünstiges Gerät bereitgestellt ist.

Weiterhin sollen derartige Mehrfachwellenlängen-Lasersysteme in optischen Abbildungssystemen umgesetzt werden, bei denen die Fähigkeit aus einer Vielzahl optischer Signalwellenlängen auszuwählen oder gleichzeitig eine Vielzahl optischer Signalwellenlängen zu verwenden wesentlich zur Erweiterung der Abbildungsfähigkeit ist.

Diese Aufgabe wird durch die in den Patentansprüchen angegebenen Maßnahmen gelöst.

Insbesondere wird die Aufgabe erfindungsgemäß durch ein System mit einem ersten Teil, der ein Lasersystem zur Erzeugung ultrakurzer Impulse einer festen Wellenlänge aufweist, und einem zweiten Teil, der zumindest einen und vorzugsweise eine Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen aufweist, gelöst. Eine Wellenlängensteuervorrichtung (oder Vorrichtungen) ist zwischen der Lasererzeugungsvorrichtung und den Wellenlängenumwandlungskanälen angeordnet, wobei die Vorrichtung(en) die Impulse der Lasererzeugungsvorrichtung in zumindest einen der Wellenlängenumwandlungskanäle richten. Eine weitere Vorrichtung oder Vielzahl von Vorrichtungen ist unterhalb der Wellenlängenumwandlungskanäle angeordnet und dient der Verbindung der Ausgaben verschiedener Wellenlängenumwandlungskanäle in einen einzelnen Ausgabekanal.

Erfindungsgemäß werden neue optische Wellenleitervorrichtungen für die Wellenlängenumwandlungskanäle, die Wellenlängensteuer- und Strahlteuervorrichtungen verwendet. Vorzugsweise wird ein Faserlasersystem zur Erzeugung ultrakurzer Impulse einer einzelnen Wellenlänge verwendet.

Das erfindungsgemäße Mehrfachwellenlängen-Lasersystem ersetzt vorteilhaft eine Vielzahl verschiedener Einzelwellenlängen-Lasersysteme. Eine besondere Anwendung für dieses System ist ein Multiphotonenmikroskop, wobei die Fähigkeit der Laserquelle, die Ultrakurzsignalwellenlänge zu wählen, einen beliebigen einzelnen Leuchtfarbstoff oder mehrere Leuchtfarbstoffe gleichzeitig versorgt.

Eine weitere Anwendung der Erfindung liegt in Systemen, welche ultrakurze optische Impulse bei Wellenlängen erfordern, welche von den Wellenlängen der Impulserzeugungslaser verschieden sind. Das erfindungsgemäße System kann beispielsweise die Ultrakurzimpulswellenlänge auf ungefähr $1,3 \mu\text{m}$ für optische Kohärenztomographie (OCT) schieben, bei welcher Gewebe am durchsichtigsten sind. In ähnlicher Weise ist das erfindungsgemäße System in der Lage, die Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse in einen Wellenlängenbereich ($1,04$ bis $1,12 \mu\text{m}$) zu verschieben, der durch Ytterbiumverstärker zur Erzeugung ultrakurzer Impulse sehr hoher Leistungen für Anwendungen wie Formgebung, Druckvorgänge und Anzeigen verstärkt werden kann.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine Ansicht einer Ultrakurzimpuls-Laserquelle;

Fig. 2 eine Ansicht eines bevorzugten Wellenleiteraufbaus für die erfindungsgemäßen Wellenlängenumwandlungskanäle;

Fig. 3 eine grafische Darstellung der Abhängigkeit des Energieschwellenwerts der theoretischen optischen parametrischen Erzeugung (OPG) von der Pumpimpulsdauer (im Wellenleiter) für Volumen- und Wellenleiterstrukturen in periodisch gepoltem Lithiumniobat (PPLN);

Fig. 4 eine grafische Darstellung der Abhängigkeit des gemessenen Wirkungsgrades der optischen parametrischen Erzeugungsumwandlung (OPG) von der Pumpenergie;

Fig. 5 eine grafische Darstellung der gemessenen Signal- und Faulenzerwellenlängen bzw. (nacheilende Wellenlängen, nachstehend als "Idlerwellenlänge" bezeichnet) über der Pumpwellenlänge bei 100°C ;

Fig. 6 eine Ansicht einer Mehrfachwellenlängenausgabe unter Verwendung eines einzelnen Wellenleiters;

Fig. 7 eine Ansicht eines Mehrfachwellenlängen-Ultrakurzimpuls-Erzeugungssystems;

Fig. 8 bis 10 Ansichten einer in der Oberfläche eines Substrats ausgebildeten optischen Verbindungsschaltmatrix zum Schalten von Impulsen aus einem oder beiden von zwei

Wellenleitern auf einen Ausgabewellenleiter;

Fig. 11 eine Ansicht einer optischen Verbindungsschaltmatrix (OCSM), die in der Lage ist, in drei Wellenlängenumwandlungskanälen verlaufende ultrakurze optische Impulse in einem einzelnen Ausgabewellenleiter zu verbinden;

Fig. 12 eine Ansicht einer optischen Trennschaltmatrix (OSSM) zur selektiven Verteilung ultrakurzer optischer Impulse aus einer einzelnen Einzelwellenlängenimpulsquelle in drei Wellenlängenumwandlungskanäle;

Fig. 13 eine Ansicht einer optischen Trennschaltmatrix (OSSM) zur selektiven Verteilung ultrakurzer Impulse in drei Wellenlängenumwandlungskanäle unter Verwendung einer akustooptischen Vorrichtung; und

Fig. 14 eine Ansicht einer optischen Trennschaltmatrix (OSSM) zur selektiven Verteilung ultrakurzer Impulse in drei Wellenlängenumwandlungskanäle unter Verwendung einer elektrooptischen Vorrichtung.

Fig. 1 zeigt eine Übersichtsdarstellung eines Ultrakurzimpulse bereitstellenden Systems mit einer einstellbaren oder veränderlichen optischen Wellenlänge oder einer Vielzahl von Wellenlängen. Das System weist einen Ultrakurzimpuls-Laser (UPL) 10 zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse einer festen Wellenlänge und zumindest einen Wellenlängenumwandlungskanal (WCC) 12₁ bis 12_n auf.

Der UPL 10 ist vorzugsweise ein Festmoden-Faseroszillator, der optische Impulse im Pikosekunden- oder Femtosekundenbereich mit typischen Impulsenergien zwischen 10 pJ ($10 \cdot 10^{-12}$ J) bis 10 nJ ($10 \cdot 10^{-9}$ J) und typischen Durchschnittsleistungen zwischen 0,1 mW bis 100 mW bereitstellt. Der Festmoden-Faseroszillator kann in einer Vielzahl von möglichen Ausgestaltungen ausgebildet sein, wie sie in den vorstehend benannten Aufsätzen von Fermann et al. beschrieben wurden. Aus den vorstehend hervorgehobenen Gründen ist es zu bevorzugen, daß der Faseroszillator einen Allfaserhohlraum bzw. einen gänzlich mit Lichtleitfasern ausgefüllten Hohlraum ohne jegliche nichtfaserartige Streuungssteuervorrichtungen aufweist. Folglich beträgt die bevorzugte Betriebswellenlänge 1,55 µm.

Ein wichtiges Merkmal des in Fig. 1 gezeigten Ausführungsbeispiels besteht darin, daß die Wellenlängenumwandlung in den WCCs in einem optischen Wellenleiter erfolgt. Die Verwendung einer nicht linearen Umwandlung erlaubt wie vorstehend beschrieben bei der derzeit bekannten Anzahl nichtlinearer Materialien nicht die Ausführung optischer parametrischer Erzeugung unter Verwendung der unverstärkten Ausgabe eines Festmoden-Faserlasers oder, allgemeiner, jeglichen anderen bekannten Festmoden-Ultrakurzimpuls-Lasers. Es wurde zum ersten Mal experimentell gezeigt, daß durch die Verwendung optischer parametrischer Erzeugung in speziell ausgestalteten Wellenleitern bei periodisch gepoltem Lithiumniobat (LiNbO₃) der OPG-Schwellenwert in den mit Ultrakurzimpuls-Oszillatoren zugänglichen Energiebereich verringert wird.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der parametrischen Erzeugung in einem Volumenkristall und in einem optischen Wellenleiter besteht darin, daß letzterer die Begrenzung des optischen Strahls auf einen kleinen Querschnittbereich ermöglicht und die Ausbreitung des optischen Strahls entlang der gesamten Wellenleiterlänge ohne Beugungsausbreitung erlaubt. Demgegenüber führt die Ausbreitung eines freien Strahls in dem Körper eines optischen Kristalls zu einer Beugungsausbreitung. Folglich führt eine erheblich höhere optische Intensität über eine lange Ausbreitungslänge für die gleiche optische Pumpleistung bei einem optischen Wellenleiter zu einer erheblich höheren optischen parametrischen Verstärkung verglichen mit einem Volumenkristall.

Weiterhin ist eine maximale Wechselwirkungslänge zwischen zwei oder mehr Ultrakurzimpulsen aufgrund ver-

schiedener Gruppengeschwindigkeiten bei verschiedenen optischen Wellenlängen begrenzt. Diese maximale, durch Wegwanderung begrenzte Länge $L_{\text{walk off}}$ ist durch die Dauer des Impulses Δt und den Parameter v_{GVM} der Gruppengeschwindigkeits-Fehlanpassung (GVM) v_{GVM} eines optischen Materials bestimmt:

$$L_{\text{walk off}} = \Delta t / v_{\text{GVM}}.$$

Der Vorteil der OPG in einem optischen Wellenleiter verglichen mit dem konfokal gebündelten Strahl im Inneren des gleichen nichtlinearen Materials (bei Entartung) kann quantitativ durch die nachstehende Formel ausgedrückt werden:

$$\frac{P_{\text{th.conf}}}{P_{\text{th.waveg.}}} = \frac{\lambda \cdot L_{\text{walk off}}}{2 \cdot n \cdot A_{\text{waveg.}}}$$

$P_{\text{th.conf}}$ und $P_{\text{th.waveg.}}$ bezeichnen dabei die entsprechenden Schwellenwerte der Spitzenleistungen für Pumpimpulse in einem Volumenkristall und in einem Wellenleiter, λ und n bezeichnen die Signalwellenlänge und den Brechungsindex an der Entartungsgrenze und $A_{\text{waveg.}}$ bezeichnet die Querschnittsfläche des Wellenleiters. Höhere Schwellenwerte der Spitzenleistung erfordern höhere Pumpimpulsenergien. Daher ist der Vorteil der Verwendung eines optischen Wellenleiters verglichen mit einem Volumenkristall umgekehrt proportional zu der Impulsdauer. Es sei angemerkt, daß bei einem Volumenmaterial der OPG-Schwellenwert unabhängig von der Impulsdauer ist.

Wie vorstehend beschrieben wurde der niedrigste OPG-Schwellenwert bei einem Volumenkristall aus periodisch gepoltem Lithiumniobat (PPLN) erzielt. Daher ist PPLN das bevorzugte Material für einen Parameterwellenleiter, obwohl andere periodisch gepolte ferroelektrische optische Materialien wie PP-Lithiumtantalat, PP-KTP, usw. vorteilhaft verwendet werden können. Die optischen Wellenleiter werden bevorzugt in einem PPLN-Substrat unter Verwendung einer bekannten Titaneindiffusions- (TI) oder Protonenaustauschtechnik (PE) hergestellt (oder einer Verbindung aus beiden Techniken (TPE)).

Fig. 2 zeigt einen bevorzugten Wellenleiteraufbau für die WCCs. Der optischen parametrischen Erzeugungsstufe (OPG) 14 ist ein in Abschnitte unterteilter Modenumwandlungsaufbau 16 vorangestellt. Der Modenumwandler 16 kann eine ähnliche Ausgestaltung aufweisen wie sie durch Chou et al. in "Adiabatically tapered periodic segmentation of channel waveguides for mode-size transformation and fundamental mode excitation"; Optics Letters, Bd. 21, Nr. 11; Juni 1996, beschrieben wurde. Da der OPG-Wellenleiter bei der längeren parametrischen Signalwellenlänge (bei diesem besonderen Ausführungsbeispiel bei $\approx 1,55$ µm) ein Monomodewellenleiter ist, aber bei der kürzeren Pumpwellenlänge (bei diesem besonderen Ausführungsbeispiel bei 780 nm) ein Multimodewellenleiter ist, ist die Verwendung des Modenumwandlers 16 vorteilhaft. Daher ist in einem derartigen Wellenleiter die Anregung einer einzelnen Grundschriftungsmoden mit der Pumpwellenlänge durch direkte Kopplung eines Pumpimpulses in den Wellenleiter schwierig. Hinsichtlich des Schwellenwerts, der Stabilität und der Umwandlungseffizienz kann die beste Leistung erzielt werden, wenn der Pumpimpuls zuerst in diese Modenumwandlung 16 eingekoppelt wird, wo er in eine Grundschriftungsmoden umgewandelt und dann in einer transversalen Grundschriftungsmoden in den OPG-Abschnitt 14 eingekoppelt wird.

Fig. 3 zeigt die Abhängigkeit des theoretischen OPG-Energieschwellenwertes von der Pumpimpulsdauer (im

Wellenleiter) für Volumen- (gepunktete Linie) und Wellenleiterstrukturen (durchgezogene Linie) aus PPLN. Der OPG-Energieschwellenwert wird unter Verwendung der vorstehend erwähnten Formel und den gemessenen 50 nJ OPG-Energieschwellenwert für Volumen-PPLN berechnet. Der für einen 2 ps langen Pumpimpuls experimentell gemessene Energieschwellenwert liegt bei ≈ 340 pJ, wie in Fig. 3 durch einen Punkt gezeigt ist. Der Schwellenwertpegel macht eine Verminderung von annähernd zwei Größenordnungen für diese spezielle Impulsdauer aus und zeigt, daß OPG mit Impulsdauern von Pikosekunden und Subpikosekunden ganz besonders in dem mit Festmodenlasern zugänglichen Energiebereich erzielt werden können. Ein Beispiel eines derartigen Faseroszillators ist in dem vorstehend genannten Artikel von Fermann et al. (Electronics Letters, Bd. 31, Nr. 3) angegeben, worin 6 bis 10 nJ Impulse mit 2 bis 4 ps Dauer beschrieben werden, was zur direkten Ansteuerung der Wellenleiter OPG-WCCs der Erfindung ausreicht.

Wie in Fig. 4 gezeigt, kann mit diesem Aufbau eine wirksame Energieumwandlung erzielt werden. Für Pumpenergien von annähernd dem vier- bis fünffachen des OPG-Schwellenwertes wurden maximale Umwandlungswirkungsgrade von $\approx 25\%$ erreicht.

Die umgewandelte optische Wellenlänge kann durch eine Temperaturabstimmung des Wellenleiters eingestellt werden (d. h., durch Steuerung der Temperatur der Substrate in welchen der Wellenleiter ausgebildet ist), wodurch eine Vielzahl optischer Wellenlängen mit einem einzelnen Wellenleiter zugänglich wird. Der OPG 14 ist instande, gleichzeitig zwei verschiedene optische Wellenlängen zu erzeugen, von denen die kürzere mit "Signal" und die längere mit "Idler" (langsamere bzw. Faulenzer bzw. nachteilende) bezeichnet wird. Daher ist ein einzelner WCC zur Erzeugung von zwei benötigten optischen Wellenlängen geeignet, indem die Pumpwellenlänge sowie das periodische Polungsintervall sorgfältig gewählt werden, so daß die Energieerhaltungs- und die Impulserhaltungsgesetze für alle drei optischen (Pump-, Signal- und Idler-) Wellenlängen erfüllt sind. Fig. 5 zeigt beispielsweise die gemessenen Signal- und Idlerwellenlängen über die Pumpwellenlänge bei einer Temperatur von 100°C und einer quasi phasenangepaßten (QPM) Gitterkonstanten von $15\ \mu\text{m}$.

Es können weiterhin mit einem einzelnen, eine Vielzahl von Wellenleitern mit verschiedenen elektrisch gepolten Perioden aufweisenden Chip Mehrfachwellenlängen erreicht werden, wie in Fig. 1 gezeigt. Auf jede vorab entworfene Wellenlänge kann durch Verschiebung des Kristalls in transversaler Richtung zur Auswahl des benötigten Wellenleiters zugegriffen werden.

Jeder WCC weist optional zumindest einen Frequenzvervielfacher HG 18 vor der OPG-Stufe 14 und zumindest einen Frequenzvervielfacher HG 20 nach der PG-Stufe 14 auf. Allgemein erlaubt dies die Erzeugung kürzerer optischer Wellenlängen als die Wellenlänge des Festmodenlasers. Alle Wellenleiter können auf einem einzelnen Chip ausgebildet sein, wodurch das System vereinfacht und zusätzliche Kopplungsverluste im Wellenleiter beseitigt sind. Falls ein Pumpimpuls im freien Raum zunächst in einen Wellenleiter eines Frequenzvervielfachers eingekoppelt wird, der bei seiner Anfangswellenlänge in einer Monomode schwingt, beispielsweise bei $1550\ \text{nm}$, dann liegt der wellenlängenumgewandelte Strahl bei einer kürzeren Wellenlänge allgemein in einer Grundswingungsmoden vor und kann direkt in die OPG-Stufe (auf demselben Chip) eingekoppelt werden. Modenumwandler können dann unnötig sein.

Ein Beispiel eines Aufbaus mit einem Mehrfachwellenlängenausgang unter Verwendung eines einzelnen Wellen-

leiters als WCC ist in Fig. 6 gezeigt. Für die Zweiphotonenmikroskopie ist beispielsweise ein spezieller Satz Ultrakurzimpulswellenlängen von $\approx 680\ \text{nm}$, $\approx 780\ \text{nm}$ und $\approx 915\ \text{nm}$ höchst wünschenswert. Dies kann durch Einkopplung einer $\approx 1550\ \text{nm}$ Faserlasereingabe in einen Wellenleiter erreicht werden, wobei dessen erster Abschnitt einen zweiten Frequenzvervielfacher 60 bildet, der durch die korrekte PPLN-Periode (bei deren Gestaltung die genaue Geometrie des Wellenleiters in Betracht gezogen werden sollte) und die Temperatur des Wellenleitersubstrats umgesetzt wird. Wenn die $1,55\ \mu\text{m}$ -Eingabe eine Monomode ist, kann der Wellenleiter in allen Abschnitten die gleiche Breite aufweisen. Dann ist die erzeugte zweite harmonische Schwingung in der Grundswingungsmoden. Die verdoppelte Ausgabe des Faserlasers bei $\approx 780\ \text{nm}$ wird weiter in den OPG-Abschnitt 62 des Wellenleiters zur gleichzeitigen Erzeugung von $\approx 1360\ \text{nm}$ als Signalwellenlänge und $\approx 1830\ \text{nm}$ als Idlerwellenlänge übertragen. Die spezifizierten Wellenlängen können gemäß den vorstehend beschriebenen Faktoren durch eine für den OPG-Abschnitt verwendete bestimmte PPLN-Periode erlangt werden. Diese beiden erzeugten Signal- und Idlerwellenlängen können getrennt voneinander in weiteren Abschnitten des Wellenleiters verdoppelt werden, wodurch jeweils $680\ \text{nm}$ - und $915\ \text{nm}$ -Wellenlängenimpulse bereitgestellt werden. Der verbleibende $780\ \text{nm}$ -Pumpimpuls wird beispielsweise für Zweiphotonenmikroskopie zusammen mit diesen beiden Wellenlängen an den zu verwendenden Ausgang übertragen. Die letzten Stufen der Vorrichtung, welche Frequenzvervielfacher 64 und 66 zur OPG-Ausgabe aufweisen, können auf demselben Substrat, getrennt auf einem verschiedenen Substrat oder Substraten oder selbst unter Verwendung von Grundmaterial verwirklicht sein.

Ein allgemeines Ausführungsbeispiel eines Systems zur Erzeugung von Mehrfachwellenlängen-Ultrakurzimpulsen ist in Fig. 7 gezeigt. Das System zur Erzeugung und Steuerung einer Mehrfachwellenlängen-Ultrakurzimpulsausgabe weist einen Ultrakurzimpuls-Laser (UPL) 10 zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse einer bestimmten Wellenlänge, einen optionalen Ultrakurzimpuls-Verstärker (UPA) 22 zur Steigerung von Leistung und Energie der Ultrakurzimpulse des UPL 10, eine optische Trennschaltermatrix (OSSM) 24 zur Verteilung von Ultrakurzimpulsen in eine Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen, zumindest einen und vorzugsweise eine Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen WCCs 12, bis 12_n, von denen jeder eine parametrische Erzeugungsstufe (PG) 14 und optionale harmonische Oszillatorenstufen (HG) 18 und 20 aufweist, und eine optische Verbindungsschaltermatrix (OCSM) 26 am Ausgang des Systems zur Verbindung der Ausgänge einer Vielzahl von WCCs zur Schaffung eines einzelnen Ausgangsstrahls auf (wenn es nur einen WCC gibt, sind die OSSM und OCSM nicht nötig).

Wenn die durch einen Festmodenfaseroszillator direkt erzeugte Impulsenergie zur Ansteuerung der Wellenleiter-WCCs unzureichend ist, kann die Laserausgabe in einem Ultrakurzimpuls-Verstärker UPA 22 verstärkt werden. Ein derartiger Verstärker ist vorzugsweise ein Faserverstärker.

Von großer Bedeutung ist, daß die zum Betreiben der Wellenleiter-WCCs benötigte niedrige Energie es erlaubt, eine relativ einfache Faserverstärkergestaltung zu verwenden. Impulse im Bereich von 1 bis $10\ \text{nJ}$ und höher können entweder direkt oder durch Verwendung kompakter und einfacher Bauarten der gechirpten Impulsverstärkung (Chirp = dynamische Wellenlängenveränderung) erzielt werden, welche auf gechirpten Fasergittern oder gechirpten PPLN-Komprimierern basiert, wie sie durch Galvanuskas et al. in "Use of Chirped-Period-Poled Lithium Niobate for Chirped

Pulse Amplification in Optic Fibers"; Ultrafast Optics 1997, Monterey CA; August 1997, beschrieben sind.

Die optische Verbindungsschaltermatrix (OCSM) 26 ist in der Lage, eine spezielle Laserquelle aus einer Vielzahl von WCCs auszuwählen. Eine konzeptionelle Draufsicht einer grundlegenden OCSM, die in einer Oberfläche eines ferroelektrischen Substrats (z. B. PPLN) ausgebildet ist, ist in Fig. 8 gezeigt. Die grundlegende OCSM ist in der Lage, Impulse der Wellenlänge λ_1 von dem Wellenleiter 30 bzw. Impulse der Wellenlänge λ_2 von dem Wellenleiter 32 in einen Hauptverbindungswellenleiter 34 (als Ausgang) zu schalten. Wie vorstehend beschrieben, ist das Substrat vorzugsweise aus einem ferroelektrischen Material wie Lithiumniobat oder Lithiumtantalat ausgebildet. Die optischen Wellenleiter werden unter Verwendung von Titaneindiffusion (TI) oder Protonenaustausch (PE) oder einer Kombination daraus (TIPE) hergestellt. Die optischen Schalter werden hergestellt, indem bestimmte Bereiche der beiden optischen Wellenleiter hinreichend nahe zusammen gebracht werden, so daß das Laserlicht von einem Wellenleiter zum anderen geschaltet werden kann.

Wie in Fig. 9 gezeigt, werden die Ultrakurzimpulse in den Wellenleitern 30 und 32 ohne äußeres elektrisches Feld nicht auf den Hauptverbindungswellenleiter 34 geschaltet und sie breiten sich weiter in den Wellenleitern 30 und 32 bis zu den optischen Endanschlüssen aus. Das Anlegen spezifischer elektrischer Spannungen verursacht eine vollständige Einkopplung der Ultrakurzimpulse der Wellenleiter 30 bzw. Wellenleiter 32 in den Hauptverbindungswellenleiter 34. Wie in Fig. 10 gezeigt, werden die ultrakurzen Lichtimpulse in dem Wellenleiter 32 in den Hauptverbindungswellenleiter 34 eingekoppelt, indem beispielsweise eine Spannung V2 an den Zwischenraum zwischen den beiden Wellenleitern angelegt wird. Zum Anlegen der jeweiligen elektrischen Felder zwischen die Wellenleiter 30 und 32 und den Hauptverbindungswellenleiter 34 können optische Richtungskoppler 36 und 38 verwendet werden, wie die in Amnon Yariv: "Introduction to Optical Electronics", S. 391-395, Holt, Rinehart and Winston, 1976, beschriebenen. Der Hauptverbindungswellenleiter 34 wird vorzugsweise unter ausschließlicher Verwendung des TIPE-Vorgangs hergestellt. Dies ermöglicht für die vielen Ultrakurzimpulse eine relativ wirksame Ausbreitung durch den Hauptverbindungswellenleiter 34 und schafft daher einen gemeinsamen Anschluß für alle WCCs.

Fig. 11 zeigt eine veranschaulichende Draufsicht des in Fig. 7 gezeigten OCSM 26. Die in Fig. 11 gezeigte OCSM ist in der Lage, drei WCCs zu handhaben, obwohl die OCSM zur Handhabung einer beliebigen Anzahl WCCs gemäß den in Fig. 11 verdeutlichten Grundsätzen entworfen sein kann. Die OCSM 26 weist drei optische Richtungskoppler 40, 42 und 44 auf, welche aus einem ferroelektrischen Material ausgebildet sind. Die optischen Hauptwellenleiter 48, 52 und 56 der drei WCCs werden unter Verwendung der Titaneindiffusion (TI) hergestellt. Der 500 nm-Ultrakurzimpulse ausbreitende Wellenleiter 48 eines ersten WCC bildet den mittleren Eingabewellenleiter mit einem Brechungsindex n_1 . Im Auszustand (keine Spannung angelegt) breitet sich der 500 nm-Ultrakurzimpuls weiter in dem Wellenleiter 48 aus (der der mittlere Abschnitt des Ausgabewellenleiters 46 wird). Durch Anlegen einer Spannung V1 werden die 500 nm-Ultrakurzimpulse auf einen Laserausgabebeschluß 50 geschaltet und absorbiert. Innerhalb des Ausgabewellenleiters 46 neigen die 500 nm-Impulse dazu, sich vor allem in dem Bereich mit dem Brechungsindex n_1 auszubreiten, wodurch ein hohes Ausmaß an Monomodebetrieb bewahrt wird.

Ein zweiter WCC-Wellenleiter 52, welcher Impulse mit

einer Wellenlänge von 780 nm bereitstellt, ist an den Ausgabewellenleiter 46 durch den zweiten hybriden optischen Richtungskoppler 42 gekoppelt. Im Auszustand werden die 780 nm-Ultrakurzimpulse in einen optischen Endanschluß 54 ausgegeben. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung V2 können die 780 nm-Ultrakurzimpulse auf den Ausgabewellenleiter 46 mit dem hybriden TIPE-Wellenleiter des Brechungsindex n_2 geschaltet werden. Die 780 nm-Impulse breiten sich vor allem innerhalb des Abschnitts des Ausgabewellenleiters mit den Brechungsindizes n_1 und n_2 aus, wodurch ein hohes Ausmaß an Monomodebetrieb bewahrt wird (d. h., die kombinierte Querschnittsfläche der n_1 - und n_2 -Bereiche stimmt mit der Monomodeausbreitung für 780 nm-Ultrakurzimpulse überein).

Das OCSM 26 weist außerdem einen weiteren hybriden optischen Richtungskoppler 44 und einen zusätzlichen TIPE-Wellenleiterabschnitt des Ausgabewellenleiters 46 mit dem Brechungsindex n_3 auf, wobei $n_1 > n_2 > n_3$ gilt. Die Wirkung dieses zusätzlichen TIPE-Wellenleiterabschnitts liegt darin, die Ausbreitung der 980 nm-Wellenleiterimpulse innerhalb des Ausgabewellenleiters 46 zu ermöglichen. Speziell die 980 nm-Impulse breiten sich vor allem über die n_1 -, n_2 - und n_3 -Bereiche aus, wobei die kombinierte Querschnittsfläche der n_1 -, n_2 - und n_3 -Bereiche mit der Monomodeausbreitung der 980 nm-Ultrakurzimpulse übereinstimmt. Falls keine Spannung an den dritten Richtungskoppler 44 angelegt ist, werden die sich in dem Wellenleiter 56 ausbreitenden Ultrakurzimpulse in einen optischen Endanschluß 58 ausgegeben. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung V3 an den hybriden optischen Richtungskoppler werden die 980 nm-Wellenlängenimpulse in den gemeinsamen hybriden Ausgabebeschluß 46 geleitet.

Obwohl der Einfachheit halber der Ausgabewellenleiter 46 in Fig. 11 so dargestellt ist, als hätte er getrennte Bereiche für die Brechungsindizes n_1 , n_2 und n_3 , ist es so aufzufassen, daß sich der Brechungsindex gradientenartig über die Breite des Ausgabewellenleiters 46 verändert, d. h., es gibt keine "Stufe" im Brechungsindex zwischen den Bereichen n_1 und n_2 und den Bereichen n_2 und n_3 . Außerdem sind die n_1 -, n_2 - und n_3 -Bereiche als im Substrat nebeneinander liegend aufzufassen, beispielsweise müssen die beiden n_2 -Bereiche nicht jeweils ein sich unter und um den n_1 -Bereich erstreckender einzelner Bereich sein.

Die optischen Richtungskoppler sind vorzugsweise hybrid, da die TIPE-Wellenleitertechnik hier verwendet wird. Die Verwendung von TIPE-Wellenleitern unterstützt die Fähigkeit, alle drei Wellenlängenquellen zum Austritt aus dem Substrat durch einen gemeinsamen Anschluß zu verbinden, wobei alle Wellenlängen im Quasimonomodebetrieb verbleiben können. Wie man sieht, wird die Komplexität der Vorrichtung erheblich erhöht, so daß sich die Mehrfachwellenlängen entlang eines einzelnen Wellenleiters ausbreiten können und dennoch in Monomode sind. Falls die Wellenlängen nahe genug beieinander sind, wird ein einzelner Wellenleiter für jeden Monomode sein.

Die in Fig. 11 gezeigte OCSM 26 kann zur Verbindung einer beliebigen Anzahl von WCCs ausgedehnt werden, lediglich durch die Größe des Substratmaterials begrenzt. Mit der Verfügbarkeit von 4-Zoll Lithiumniobatwafern ist es möglich, bis zu zehn verschiedene WCCs zu verbinden. Mit einer steigenden Zahl von WCCs wird die Gestaltung der vielen TIPE-Wellenleiterabschnitte kritischer.

Die vorstehende Beschreibung bezieht sich auf die Verbindung von Signalimpulsen, die in jedem der WCCs empfangen werden. Dasselbe Prinzip kann genauso gut auf das Schalten des Idlersignals in jedem der WCCs ausgedehnt werden.

Es wird angemerkt, daß alternativ zu der vorstehend be-

schriebenen neuen OSCM 26 die verbindende Wirkungsweise unter Verwendung bekannter Vorrichtungen durchgeführt werden kann, welche außerhalb des integrierten optischen Chips sind. Es gibt beispielsweise eine Anzahl bekannter Einrichtungen zur Verbindung mehrerer Wellenlängen in einem gemeinsamen Strahlengang. Diese Einrichtungen wurden in WDM-Systemen verwendet. Die einfachste Einrichtung ist eine Reihe dichroitischer Spiegel. Ein weiterer Ansatz besteht in der Verwendung eines Faser-WDM. Allgemein kann die OSCM 26 der Erfindung ein beliebiges Verfahren anwenden, welches in WDM-Systemen zur Verbindung verschiedener Wellenlängen verwendet wird.

Der Aufbau der optischen Trennschaltermatrix (OSSM) 24 gemäß Fig. 7 ist verallgemeinernd in Fig. 12 gezeigt. Die OSSM 24 speist direkt Ultrakurzimpulse (beispielsweise 1,55 μm) des UPL 10 in einen beliebigen oder mehrere WCCs ein. Die Steuerung der Ultrakurzimpulse aus dem Eingabeanschluß der OSSM 24 zu einem beliebigen WCC wird entweder unter Verwendung eines elektrooptischen oder des akustooptischen Verfahrens ausgeführt, wie nachstehend beschrieben wird.

Fig. 12 zeigt die Verwendung eines optischen 1x3-Richtungskopplers 60 zur Verteilung der Eingangsstrahlung zu einem beliebigen oder allen Ausgabeanschlüssen. Die Impulse mit 1,55 μm Wellenlänge werden in einen optischen Wellenleiter eingespeist, welcher durch TI, PE oder TIPE auf einem ferroelektrischen Substrat wie Lithiumniobat oder Lithiumtantalat hergestellt ist. Alle Wellenleiter weisen dieselbe Breitenquerschnittfläche auf, die zur Monomodeausbreitung mit der Quellenwellenlänge gestaltet ist. Die Bedingung für den Trennungsvorgang wird geregelt, indem Spannungen V1 oder V2 an den optischen 1x3-Richtungskoppler 60 angelegt werden. In den WCCs können geeignete Modenumwandler 16 zur Sicherstellung einer optimierten Vorrichtungsarbeitsweise verwendet werden, d. h., minimale Überschußverluste und hoher Wirkungsgrad der Wechselwirkung in den WCCs (vgl. Fig. 2). Die an die 1x3-OSSM angelegte Schaltspannung kann mit dem vorstehend beschriebenen Schaltvorgang der OSCM 26 synchronisiert werden. Die in Fig. 12 gezeigte OSSM 24 kann unter Verwendung elektroakustisch oder elektrooptisch aktiver Schalter verwirklicht werden. Es ist ebenfalls möglich, wellengeführte optische Gitter zur Verwirklichung dieser OSSM zu verwenden.

Fig. 13 zeigt eine neue auf akustischen Oberflächenwellen (SAWs) basierende Verwirklichung einer 1x3-OSSM, wobei die SAWs durch die interdigitalen Wandler IDT1 70 und IDT2 72 erzeugt werden. Wie in Fig. 13 gezeigt ist, werden die IDT1 70 und IDT2 72 auf der Substratoberfläche angeordnet. Die mit Δn_1 , Δn_2 und Δn_3 bezeichneten optischen Wellenleiterbereiche weisen einen leicht höheren Index als der optische Basis-1x3-Wellenleiteraufbau auf. Das Substratmaterial ist vorzugsweise ferroelektrisch mit unter Verwendung der TI hergestellten Wellenleitern. Die Wellenleiterbereiche mit einem leicht höheren Index sind unter Verwendung des PE hergestellt. Der Brechungsindexwechsel kann durch geeignetes Ausheilen minimiert werden, wie es durch diesen Aufbau erforderlich ist. Wenn an die interdigitalen Wandler keine elektrischen Signale angelegt werden, wird der Strahlengang des 1,55 μm -Laserlichts geradeaus in den mittleren Ausgabeanschluß der 1x3-OSSM geführt. Wenn eine Spannung V1 an den IDT 70 angelegt wird, lenken die erzeugten akustischen Oberflächenwellen das 1,55 μm -Laserlicht in den ersten (z. B. oberen) Ausgabeanschluß der 1x3-Struktur ab. Genauso wird der 1,55 μm -Ultrakurzimpuls in den dritten (z. B. unteren) Ausgabeanschluß der 1x3-Wellenleiterstruktur abgelenkt, wenn eine Spannung V2 an den IDT2 72 angelegt wird. Richtung

und Ausmaß der Ablenkung des Eingabeimpulses hängt sowohl von den angelegten Spannungen als auch den Werten Δn ab. Die Anordnung der IDTs auf der Substratoberfläche kann zur Verbesserung des Wirkungsgrades optimiert werden. Mit einem derartigen Aufbau können Wirkungsgrade über 90% verwirklicht werden. Die Einspeiseverluste werden durch den Δn -Aufbau minimiert.

Für eine gleichmäßige Verteilung der Eingabelaserstrahlung in alle drei Ausgabeanschlüsse der 1x3-OSSM können die Δn 's der drei hybriden Wellenleiterbereiche durch kürzere Ausheilzeiten oder längere PE-Zeiten erhöht werden. In dieser Betriebsart werden beide an die OSSM angelegte Spannungen V1 und V2 zur Optimierung des gleichmäßigen Trennvorgangs benötigt.

Anstelle der Verwendung einer akustooptischen Vorrichtung zur Ablenkung des Eingangsimpulses kann der Schaltvorgang unter Verwendung eines elektrooptisch induzierten Gitters (EOG) umgesetzt werden, indem ein Paar vergitterte metallische Elektroden auf den ferroelektrischen Substraten verwendet werden. Fig. 14 zeigt eine neue Verwirklichung einer derartigen 1x3-OSSM. Die optische 1x3-Wellenleitervorrichtung und die Lage der drei Bereiche mit einem geeigneten höheren Δn ist ähnlich zu dem, was hinsichtlich der akustooptisch basierten 1x3-OSSM beschrieben und in Fig. 13 gezeigt ist. Durch Anlegen einer Spannung V1 an das EOG1 80 wird ein periodischer Brechungsindexwechsel bewirkt, der ähnlich dem durch den IDT gemäß Fig. 13 erzeugten ist. Das Intervall der metallischen elektrooptisch induzierten Gitterstruktur ist derart gestaltet, daß der 1,55 μm -Impuls auf den ersten (z. B. oberen) Ausgabeanschluß der 1x3-Wellenleitervorrichtung geschaltet wird. Falls keine Spannung angelegt ist, wird der 1,55 μm -Eingabeimpuls direkt in den mittleren Anschluß der 1x3-OSSM-Vorrichtung weiter geleitet. Falls eine Spannung V2 an das EOG2 82 angelegt wird, wird der eintreffende 1,55 μm -Eingabeimpuls geeignet auf den dritten (z. B. unteren) Ausgabeanschluß der 1x3-Vorrichtung geschaltet. Die Brechungsindexwechsel der drei hybriden Wellenleiterstrukturen in der 1x3-OSSM können erhöht werden, damit ein gleichmäßiges Aufteilen der eintreffenden Pump Laserstrahlung in die drei Ausgabeanschlüsse ermöglicht wird. Dann werden beide EOGs 80 und 82 zur Optimierung der Aufteilung verwendet. Die hier beschriebenen akustooptischen und elektrooptischen Vorrichtungen können beispielsweise jene sein, die zum Schalten in Telekommunikationsschaltungen verwendet werden. Natürlich können auch andere Schalteinrichtungen für integrierte optische Schaltungen der Telekommunikationsanwendungen verwendet werden.

Wie für die OSCM vorstehend beschrieben wurde, kann sich die OSSM von einer 1x3- bis zu einer 1x10-Struktur erstrecken. Die kritische Grenze wird auch hier von den Abmessungen des ferroelektrischen Wafers gebildet. Bei einem größeren Element als die 1x3-OSSM können die hybriden PE-Abschnitte durch mehrfache PE-Vorgänge zum Ausgleich höherer Aufteilungsverluste bei größeren Teilungswinkeln verwirklicht werden, wie es durch den gesamten OSSM-, WCC- und OSCM-Aufbau erforderlich ist. Die OSSM 24, WCCs und OSCM 26 sind vorzugsweise auf einem einzelnen Substrat ausgebildet.

Der spezielle Aufbau der Mehrfachwellenlängenquelle hängt sehr stark von der Anwendung ab. Eine Mehrfachwellenlängenquelle in einem System erhöht die Möglichkeiten des Systems sehr vielfältig. Gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird die Mehrfachwellenlängenquelle als Quelle für ein Zweiphotonenmikroskop verwendet. Es ist der Zweck des Lasers, die Verwendung einer höheren Anzahl von Farbstoffen in einem System zu ermöglichen, was die Verwendung verschiedener Anregungswellenlängen er-

fordert. Dies vervielfältigt die Verwendbarkeit derartiger Mikroskope. Es kann beispielsweise hilfreich sein, den Laser schnell von 780 nm auf 700 nm und auf 850 nm abzustimmen. Ebenso kann es hilfreich sein, den Laser schnell abzustimmen oder gleichzeitig Impulse bei Wellenlängen von 680 nm, 780 nm und 915 nm (siehe Fig. 6) zu erzeugen. Derartige Laser können für die Farbstoffe verwendet werden, welche günstig durch jede dieser Wellenlängen angeregt werden.

Die Farbstoffe Rhodamin, HT29 und HOE33342 werden beispielsweise durch die Zweiphotonen-Anregung bei 780 nm angeregt. Diese werden jeweils zur Markierung von Leberzellen, Darmkrebs und Keimen verwendet. Die Farbstoffe Fura-2, Indo-1, grünes Leuchtprotein und FITC werden durch die Zweiphotonenanregung bei 700 nm angeregt. Diese sind sehr hilfreich zur Strukturmarkierung und zum Aufspüren der Kalziumumwandlung in verästelten Nervenstrukturen. Eine Dreiphotonenanregung bei ungefähr 280 nm unter Verwendung von 850 nm des Lasers kann verwendet werden, um Autofluoreszenz bei Serotonin, Tryptophan und NADH oder NAD(P)H zu verursachen. Serotonin ist ein Schlüsselmaß der neuralen Aktivität als dem hauptaminergen Argenz im Hirn. NADH und NAD(P)H werden zum Aufspüren von Aktivitäten bei der Identifizierung von beispielsweise Hautmelanomen verwendet.

Da eine Mehrfachwellenlängenquelle für die herkömmliche konfokale Mikroskopie ebenso wünschenswert ist, kann die Quelle eher für herkömmliche als für Multiphotonenanregung verwendet werden, indem ein Farbstoff verwendet wird, der eher die Grundwellenlänge als die halbe Wellenlänge absorbiert. Es kann wünschenswert sein, den zeitlichen Impuls zu einem längeren Impuls auszudehnen, wodurch die Spitzenleistung nicht für die Zweiphotonenanregung ausreicht. Daher muß der Laser in diesem Fall in der Lage sein, auf die in der konfokalen Mikroskopie verwendeten allgemeinen Wellenlängen umzuschalten, wie 482 nm und 514 nm von Argonionenlasern, 632 nm von HeNe und 780 nm von Titan-Saphir.

Es ist außerdem sehr wünschenswert, die Leistung von ultraschnellen Quellen zu steigern. Für viele Anwendungen werden höhere Leistungen benötigt, beispielsweise bei Verfahren, die einer spanenden Formgebung entsprechen. Es wurde gezeigt, daß ultraschnelle Faserlaser mit Erbium-Verstärkern bis zu einem Watt verstärkt werden können. Derzeit ist jedoch die Leistung auf zehn Watt begrenzt, was für viele spanende Formgebungsverfahren zu niedrig ist. In jüngster Zeit wurden Ytterbium-Faserverstärker mit 40 Watt Ausgangsleistung vorgestellt. Diese Verstärker sind effizienter als Erbium und werden für höhere Leistungen bevorzugt. Diese Fasern weisen eine große Bandbreite auf und können einen sehr kurzen Impuls unterstützen, aber es existiert keine kommerziell erhältliche ultraschnelle Quelle für diese Wellenlängen (d. h., 1,04–1,12 µm). Mit einem OPG-Frequenzumwandler kann die Ausgabe einer eher herkömmlichen (z. B. Erbium) ultraschnellen Quelle zu Wellenlängen oberhalb des Ytrbium-Verstärkers hin umgewandelt werden. Dies erlaubt eine sehr hohe Leistungsquelle.

Ytterbium-YAG ist ein weiterer Hochleistungsverstärker, der noch höhere Leistungen erreichen kann. Mit Ytterbium-YAG wurden 200 Watt Durchschnittsleistung erzielt und auch hier existiert keine herkömmliche ultraschnelle Quelle bei der Wellenlänge von Ytterbium-Yag.

Eine RGB-Quelle für kommerzielle Anzeige- oder Druckausgabezwecke ist eine der Hauptanwendungen des Ytterbium-Verstärkers. Auch hier kann nach der Verstärkung durch den Ytterbium-Verstärker eine OPG-Wellenleitervorrichtung hinzugefügt werden, welche die ultraschnellen Impulse gleichzeitig oder getrennt in rote, grüne und

blaue Wellenlängen umwandelt. Die integrierte optische Schaltung der vorstehend beschriebenen Art kann außerdem diesen Schalterschaltkreis zum An- oder Abschalten der Farben für die Abbildung beinhalten. Die ultraschnellen Impulse bieten den Vorteil, daß die mit hoher Spitzenleistung und großer Bandbreite bei jeder Farbe erzielte effiziente Umwandlung die von dem Laser stammende Fleckigkeit minimiert (Fleckigkeit läßt das Bild für das Auge körnig erscheinen).

Optische Kohärenztomographie (OCT) wurde als Medizin- bzw. Augenabbildungshilfsmittel entwickelt. Es ist in der Lage, Licht zur Abbildung durch menschliches Gewebe hindurch zu verwenden, von dem Licht stark gestreut wird. Es wurde nachgewiesen, daß die OCT Bilder mit einer besseren Auflösung als andere medizinische Abbildungsverfahren wie MRI, Computertomographie oder Ultraschall liefert. Die axiale Auflösung liegt bei 10 µm und kann auf 2 µm reduziert werden, wenn eine Lichtquelle einer kurzen Kohärenzlänge wie ein Femtosekunden-Laser verwendet wird. Die Abbildungstiefe ist jedoch auf 3 mm begrenzt. Eine erwünschte Eigenschaft des OCT ist, daß es eine einfache und billige Lichtquelle wie eine Superleuchtdiode verwenden kann. Es wird jedoch eine bessere Leistungsfähigkeit durch die Verwendung eines Festmodenlasers erzielt. Beispielsweise bei der Abbildung am lebenden Objekt bei dem Herz eines Froschembryos benötigt es 20 s bis zum Erhalt eines Bildes, wenn eine Superleuchtdiode verwendet wird, aber lediglich 0,25 s, wenn ein Festmodenlaser verwendet wird, was es den Forschern ermöglicht, die Bewegung des schlagenden Herzens während den diastolischen und den systolischen Phasen festzuhalten. Für diese schnelle Abbildung kann eine Schnellabtastung (2000 Hz) angewendet werden. Sowohl Titan-Saphir-Festmodenlaser als auch Chrom-Forsterit-Festmodenlaser wurden für die OCT verwendet. Chrom-Forsterit ist wegen seiner Wellenlänge (1300 nm) besonders gut zur Abbildung bei biologischen Geweben geeignet; bei größeren Wellenlängen werden Streueffekte reduziert, welche die Abbildungstiefe begrenzen. Da das Verfahren kompatibel mit der Fasertechnik ist, wurde es erfolgreich bei der Endoskopie verwendet. Wie durch Tearney et al. in "Rapid acquisition of in vivo biological images by use of optical coherence tomography", Optics Letters, Bd. 21, Nr. 17, September 1995, berichtet wird, wurde eine radial abtastende Katheterendoskopsonde mit schneller Abbildung vorgestellt. OCT wurde in einer Anzahl von klinischen und erforschenden Experimenten vorgestellt, u. a. bei der Krebsuntersuchung der menschlichen Magenwand, bei der Suboberflächenabbildung und Histologie der Speiseröhrenwand des Schweins, bei der Durchführung optischer Biopsie zur Ersetzung der entfernenden Biopsie und bei der Abbildung von Blutdurchflußgeschwindigkeiten unter Verwendung der Farbverdopplungs-OCT (CDOCT). Verbunden mit einer Katheter-, endoskopischen oder laparoskopischen Zuführung verspricht die OCT die Projektierung und Diagnose eines breiten Bereichs von Krankheiten zu ermöglichen, inklusive karzinogenen und präkarzinogenen Gewebeveränderungen, ohne dabei eine entfernende Biopsie und histologische Verfahren zu benötigen. In Verbindung mit herkömmlicher Mikroskopie ermöglicht die OCT die Abbildung innerer Strukturen bei lebenden Exemplaren ohne eine Opferung und Histologie zu benötigen.

Daher ist für das Gebiet der OCT-Abbildung im menschlichen Gewebe eine 1,3 µm Laserquelle erwünscht. Ein mit Erbium dotierter Laser, der mit einer OPG-Wellenleitervorrichtung auf 1,3 µm umgewandelt wird, wäre für diese Anwendung geeignet.

Wie vorstehend beschrieben weist ein Mehrfachwellenlängen-Ultrakurzimpuls-Lasersystem eine Ultrakurzim-

pulse einer festen Wellenlänge erzeugende Laserquelle 10 und zumindest eine bzw. vorzugsweise eine Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen 12₁-12_n auf. Das Faserlasersystem wird bevorzugt zur Erzeugung von Ultrakurzimpulsen einer einzelnen Wellenlänge verwendet. Eine optische Trennschaltermatrix 24 richtet die Impulse der Laserquelle in zumindest einen der Wellenlängenumwandlungskanäle 12₁-12_n. Eine optische Verbindungsschaltermatrix 26 wird oberhalb der Wellenlängenumwandlungskanäle 12₁-12_n angeordnet und verbindet die Ausgaben der unterschiedlichen Wellenlängenumwandlungskanäle 12₁-12_n in einem einzelnen Ausgabekanal. In einem ferroelektrischen Substrat durch Titaneindiffusion (TI) bzw. Protonenaustausch (PE) ausgebildete Wellenleiter bilden vorzugsweise die Wellenleiterumwandlungskanäle 12₁ 12_n und die Trennungs- und Verbindungsmatrizen 24 und 26. Die Verwendung des Wellenleiters erlaubt das Auftreten einer wirksamen optischen parametrischen Erzeugung 14 in den Wellenlängenumwandlungskanälen 12₁-12_n bei Impulsenergien, die über eine Festmodenlaserquelle verfügbar sind. Das Mehrfachwellenlängen-Lasersystem kann eine Vielzahl von verschiedenen Einzelwellenlängen-Lasersystemen ersetzen. Eine besondere Anwendung des Systems ist ein Multiphotonenmikroskop, bei dem die Fähigkeit, die Ultrakurzsignalwellenlänge der Laserquelle zu wählen, einen beliebigen einzelnen Leuchtfarbstoff oder mehrere Leuchtfarbstoffe gleichzeitig bewältigt. In seiner einfachsten Ausführung kann das System zur Umwandlung der Laserwellenlänge in eine günstigere Wellenlänge verwendet werden. Bei 1,55 µm durch einen Festmodenerbiumfaserlaser erzeugte Impulse können beispielsweise zu 1,3 µm für eine Verwendung bei der optischen Kohärenztomographie oder in 1,04 bis 1,12 µm zur Verstärkung durch einen Ytterbiumverstärker umgewandelt werden, wodurch die Verstärkung der in einem Anzeige-, Druck- oder Formgebungssystem verwendbaren Impulse ermöglicht wird.

Patentansprüche

1. Ultrakurzimpulsquelle zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse bei einer Vielzahl verschiedener Wellenlängen mit einem ultrakurze optische Impulse erzeugenden Festmodenlaser (10) und einem Wellenlängenumwandlungskanal (12) zur Umwandlung einer Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse in eine andere Wellenlänge, mit einem in einem Substrat ausgebildeten optischen Wellenleiter, wobei der optische Wellenleiter einen optischen parametrischen Erzeugungsabschnitt (14, 62) zur parametrischen Verstärkung der ultrakurzen optischen Impulse aufweist.
2. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 1, wobei das Substrat ein periodisch gepoltes ferroelektrisches optisches Material aufweist.
3. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 2, wobei das periodisch gepolte ferroelektrische optische Material Lithiumniobat, Lithiumtantalat oder KTP ist.
4. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 1, wobei der Wellenlängenumwandlungskanal (12) die Wellenlängen der ultrakurzen optischen Impulse in Abhängigkeit von zumindest einer der folgenden Größen umwandelt: der Temperatur des Wellenlängenumwandlungskanals (12), der Wellenlänge des in den Wellenlängenumwandlungskanal (12) gepumpten Lichts, sowie dem periodischen Polungsintervall eines elektrischen Feldes in dem Wellenlängenumwandlungskanal (12).
5. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 1, wobei der

Festmodenlaser (10) ein Faserlaser ist.

6. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 5, wobei der Faserlaser ein mit Erbium dotierter Faserlaser ist.
7. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 1, wobei der Festmodenlaser (10) ein Festmoden-Titan-Saphir-Laser oder ein Festmoden-Chrom-Forsterit-Laser ist.
8. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 1, wobei der Wellenlängenumwandlungskanal 12 weiterhin zumindest einen Frequenzvervielfacher (18, 20, 60, 64, 66) zur Erzeugung von ultrakurzen optischen Impulsen aufweist, deren Wellenlänge kürzer als die Wellenlänge der durch den Festmodenlaser (10) erzeugten ultrakurzen Impulse ist.
9. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 1, zudem mit einem in Signalfußrichtung oberhalb dem Wellenlängenumwandlungskanal (12) angeordneten Ultrakurzimpuls-Verstärker (22) zur Verstärkung des ultrakurzen optischen Impulses.
10. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 9, wobei der Ultrakurzimpuls-Verstärker (22) ein Erbium-Faserverstärker ist.
11. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 1, zudem mit einem in Signalfußrichtung unterhalb dem Wellenlängenumwandlungskanal (12) angeordneten Ultrakurzimpuls-Verstärker, wobei der Ultrakurzimpuls-Verstärker ein Ytterbium-Verstärker oder ein Ytterbium-YAG-Verstärker ist.
12. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 1, wobei der Wellenlängenumwandlungskanal (12) einer aus einer Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen (12₁-12_n) ist, von denen jeder einen optischen Wellenleiter aufweist, die Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse umwandelt und eine parametrische Verstärkung der ultrakurzen optischen Impulse verursacht, wobei die Ultrakurzimpulsquelle weiterhin einen ersten optischen Schalter (24) zum Richten der Energie des ultrakurzen optischen Impulses in zumindest einen der Wellenlängenumwandlungskanäle (12₁-12_n) und einen zweiten optischen Schalter (26) zum Richten der ultrakurzen optischen Impulse in jedem der Wellenlängenumwandlungskanäle (12₁-12_n) in einen einzelnen Ausgabewellenleiter aufweist.
13. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 12, wobei der erste optische Schalter (24) einen Wellenleiter mit einem ersten Brechungsindex aufweist, der einen einzelnen optischen Eingabewellenleiter mit n optischen Ausgabewellenleitern verbindet, wobei n eine ganze Zahl größer als 1 ist und der Wellenleiter n Bereiche verschiedener Brechungsindizes zum Führen optischer Impulse von dem einzelnen optischen Eingabewellenleiter zu den jeweiligen der n optischen Ausgabewellenleiter aufweist.
14. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 13, wobei der Wellenleiter in einem ferroelektrischen optischen Material durch Titaneindiffusion ausgebildet ist und die n Bereiche verschiedener Brechungsindizes durch Protonenaustausch ausgebildet sind.
15. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 13, wobei die von dem einzelnen optischen Eingabewellenleiter empfangene Energie der ultrakurzen optischen Impulse im wesentlichen gleichmäßig auf die Vielzahl der n optischen Ausgabewellenleiter verteilt wird.
16. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 13, wobei der erste optische Schalter (24) weiterhin einen 1xn-Richtungskoppler (60) zum Richten der an dem einzelnen optischen Eingabewellenleiter empfangenen Energie der ultrakurzen optischen Impulse in einen beliebigen

gen einzelnen oder eine beliebige Kombination aus den n Bereichen verschiedener Brechungsindices, wodurch die von dem einzelnen optischen Eingabewellenleiter empfangene Energie der ultrakurzen optischen Impulse in einen einzelnen oder eine beliebige Kombination aus den n optischen Ausgabewellenleitern geleitet wird.

17. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 16, wobei der 1xn-Richtungskoppler (60) n akustooptische Vorrichtungen zur Erzeugung akustischer Oberflächenwellen aufweist, die geeignet sind, an dem einzelnen optischen Eingabewellenleiter empfangene ultrakurze optische Impulse in entsprechende der n optischen Ausgabewellenleiter abzulenken.

18. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 17, wobei die n akustooptischen Vorrichtungen interdigitale Wandler (IDT1, IDT2) sind.

19. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 16, wobei der 1xn-Richtungskoppler n elektrooptische Vorrichtungen (80, 82) aufweist, geeignet sind, an dem einzelnen optischen Eingabewellenleiter empfangene ultrakurze optische Impulse in entsprechende der n optischen Ausgabewellenleiter abzulenken.

20. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 19, wobei die n elektrooptischen Vorrichtungen (80, 82) elektrooptisch induzierte Gitter sind.

21. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 12, wobei der zweite optische Schalter (26) einen Ausgabewellenleiter (46) und n optische Richtungskoppler (40, 42, 44) aufweist, wobei n eine ganze Zahl größer als 1 ist und von denen jeder jeweils einen von n optischen Wellenleitern (48, 52, 56) an den Ausgabewellenleiter (46) koppelt, wobei das Anlegen einer Spannung an einen der n optischen Richtungskoppler (40, 42, 44) ultrakurze optische Impulse, die sich in einem entsprechenden der n optischen Wellenleiter (48, 52, 56) ausbreiten, in den Ausgabewellenleiter (46) einkoppelt.

22. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 21, wobei sich ultrakurze optische Impulse von einer Vielzahl der n optischen Wellenleiter (48, 52, 56) gleichzeitig in dem Ausgabewellenleiter (46) ausbreiten.

23. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 21, wobei der Ausgabewellenleiter (46) n sich axial erstreckende Abschnitte mit jeweils unterschiedlichem Brechungsindex aufweist, wobei in den Ausgabewellenleiter (46) von einem optischen Wellenleiter i (48, 52, 56) eingekoppelte ultrakurze optische Impulse sich im wesentlichen in sich axial erstreckenden Abschnitten 1 bis i ausbreiten, wobei i eine ganze Zahl von 1 bis n ist, so daß sich ultrakurze optische Impulse verschiedener Wellenlängen in dem Ausgabewellenleiter (46) im wesentlichen in einer einzelnen Mode ausbreiten.

24. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 21, wobei der Ausgabewellenleiter (46) in einem ferroelektrischen Material durch zumindest Titaneindiffusion oder Protonenaustausch ausgebildet ist.

25. Optischer Schalter mit einem Wellenleiter mit einem ersten Brechungsindex, der einen einzelnen optischen Eingabewellenleiter mit n optischen Ausgabewellenleitern verbindet, wobei n eine ganze Zahl größer als 1 ist, dabei weist der Wellenleiter n Bereiche verschiedener Brechungsindices zum Führen optischer Impulse von dem einzelnen optischen Eingabewellenleiter an die jeweiligen der n optischen Ausgabewellenleiter auf, und einem 1xn-Richtungskoppler zum Richten der Energie eines sich in dem einzelnen optischen Eingabewellenleiter ausbreitenden ultrakurzen optischen Impulses in

einen beliebigen einzelnen oder eine beliebige Kombination aus den n Bereichen verschiedener Brechungsindices, wodurch die Energie des ultrakurzen optischen Impulses in einen einzelnen oder eine beliebige Kombination aus den n optischen Ausgabewellenleitern geleitet wird.

26. Optischer Schalter nach Anspruch 25, wobei der 1xn-Richtungskoppler n akustooptische Vorrichtungen zur Erzeugung von akustischen Oberflächenwellen aufweist, die geeignet sind, den ultrakurzen optischen Impuls in einen entsprechenden der n optischen Ausgabewellenleiter abzulenken.

27. Optischer Schalter nach Anspruch 26, wobei die n akustooptischen Vorrichtungen interdigitale Wandler sind.

28. Optischer Schalter nach Anspruch 25, wobei der 1xn-Richtungskoppler n elektrooptische Vorrichtungen aufweist, die geeignet sind, den ultrakurzen optischen Impuls in einen entsprechenden der n optischen Ausgabewellenleiter abzulenken.

29. Optischer Schalter nach Anspruch 28, wobei die n elektrooptischen Vorrichtungen elektrooptisch induzierte Gitter (80, 82) sind.

30. Optischer Schalter nach Anspruch 25, wobei die Energie des ultrakurzen optischen Impulses im wesentlichen gleich über die Vielzahl der n optischen Ausgabewellenleiter verteilt ist.

31. Optischer Schalter nach Anspruch 25, wobei der Wellenleiter in einem ferroelektrischen optischen Material durch Titaneindiffusion ausgebildet ist und die n Bereiche verschiedener Brechungsindices durch Protonenaustausch ausgebildet sind.

32. Optischer Schalter mit einem optischen Ausgabewellenleiter (46) und n optischen Richtungskopplern (40, 42, 44), wobei n eine ganze Zahl größer 1 ist und jeder jeweils einen von n optischen Wellenleitern (48, 52, 56) an den Ausgabewellenleiter (46) koppelt, wobei das Anlegen einer Spannung an einen der n optischen Richtungskoppler (40, 42, 44) ultrakurze optische Impulse, die sich in einem entsprechenden der n optischen Wellenleiter (48, 52, 56) ausbreiten, in den Ausgabewellenleiter (46) einkoppelt.

33. Optischer Schalter nach Anspruch 32, wobei sich ultrakurze optische Impulse von einer Vielzahl von n optischen Wellenleitern (48, 52, 56) gleichzeitig in dem Ausgabewellenleiter (46) ausbreiten.

34. Optischer Schalter nach Anspruch 32, wobei der Ausgabewellenleiter (46) n sich axial erstreckende Abschnitte mit jeweils unterschiedlichem Brechungsindex aufweist, wobei in den Ausgabewellenleiter (46) von einem optischen Wellenleiter i (48, 52, 56) eingekoppelte ultrakurze optische Impulse sich im wesentlichen in sich axial erstreckenden Abschnitten 1 bis i ausbreiten, wobei i eine ganze Zahl von 1 bis n ist, so daß sich ultrakurze optische Impulse verschiedener Wellenlängen in dem Ausgabewellenleiter (46) im wesentlichen in einer einzelnen Mode ausbreiten.

35. Optischer Schalter nach Anspruch 32, wobei der Ausgabewellenleiter (46) in einem ferroelektrischen optischen Material durch zumindest Titandiffusion oder Protonenaustausch ausgebildet ist.

36. System mit einem Mikroskop zum Erfassen einer durch Absorption ultrakurzer Impulse angeregten Fluoreszenz von Farbstoffen und einer Ultrakurzimpulsquelle zum Zuführen ultrakurzer optischer Impulse zu dem Mikroskop, wobei die Ultra-

kurzimpulsquelle versehen ist mit einem Laser zum Erzeugen ultrakurzer optischer Impulse bei einer einzelnen Wellenlänge, einer Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen zum Umwandeln der ultrakurzen optischen Impulse in eine Vielzahl entsprechend verschiedener Wellenlängen und einem optischen Schalter zum Schalten ultrakurzer optischer Impulse von einem beliebigen einzelnen oder einer beliebigen Kombination der Wellenlängenumwandlungskanäle in einen einzelnen Ausgabekanal, wodurch die Ultrakurzimpulsquelle geeignet ist, ultrakurze optische Impulse einer Vielzahl verschiedener Wellenlängen dem Mikroskop zuzuführen.

37. System nach Anspruch 36, wobei das Mikroskop die Farbstoffe unter Verwendung der Zweiphotonenmikroskopie anregt.

38. System nach Anspruch 36, wobei der Laser ein Festmodenlaser ist.

39. System nach Anspruch 36, wobei jeder der Wellenlängenumwandlungskanäle einen optischen parametrischen Erzeugungsabschnitt aufweist, der parametrisch die ultrakurzen optischen Impulse verstärkt.

40. System nach Anspruch 39, wobei jeder der Wellenlängenumwandlungskanäle einen in einem ferroelektrischen optischen Material ausgebildeten Wellenleiter aufweist.

41. System mit einer Farbanzeige zum Anzeigen roter, grüner und blauer Bilder und einer Ultrakurzimpulsquelle zum Zuführen von Bild-
daten an die Farbanzeige in der Gestalt von roten, grünen und blauen ultrakurzen optischen Impulsen, wobei die Ultrakurzimpulsquelle versehen ist mit einem Laser zum Erzeugen ultrakurzer optischer Impulse bei einer einzelnen Wellenlänge, einem ersten Wellenlängenumwandlungskanal zum Umwandeln der Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse zur Erzeugung roter ultrakurzer optischer Impulse, einem zweiten Wellenlängenumwandlungskanal zum Umwandeln der Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse zur Erzeugung blauer ultrakurzer optischer Impulse und einem dritten Wellenlängenumwandlungskanal zum Umwandeln der Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse zur Erzeugung grüner ultrakurzer optischer Impulse.

42. System nach Anspruch 41, wobei der Laser ein Festmodenlaser ist.

43. System nach Anspruch 41, wobei jeder der ersten, zweiten und dritten Wellenlängenumwandlungskanäle einen optischen parametrischen Erzeugungsabschnitt aufweist, der die ultrakurzen optischen Impulse parametrisch verstärkt.

44. System nach Anspruch 43, wobei jeder der ersten, zweiten und dritten Wellenlängenumwandlungskanäle einen in einem ferroelektrischen optischen Material ausgebildeten Wellenleiter aufweist.

45. Ultrakurzimpulsquelle zum Erzeugen ultrakurzer optischer Impulse bei einer Vielzahl verschiedener Wellenlängen mit einem ultrakurze optische Impulse erzeugenden Festmodenlaser und einem Wellenlängenumwandlungsabschnitt mit einem optischen parametrischen Erzeugungsabschnitt und mit einem wellenleiterbasierten optischen Schaltabschnitt, der einen einzelnen optischen Eingabewellenleiter mit n optischen Ausgabewellenleitern verbindet, wobei n eine ganze Zahl größer 1 ist und akustooptische oder elektrooptische Einrichtungen zum wirksamen Schalten optischer Impulse von dem einzelnen optischen

Eingabewellenleiter auf die entsprechenden der n optischen Ausgabewellenleiter bereitgestellt sind.

46. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 45, wobei der Wellenlängenumwandlungsabschnitt in einem ferroelektrischen optischen Material ausgebildet ist.

47. Ultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 46, wobei der Wellenlängenumwandlungsabschnitt die Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse in Abhängigkeit von zumindest dem periodischen Polungsintervall des ferroelektrischen Materials umwandelt.

48. Mehrfachwellenlängenultrakurzimpulsquelle mit einem Laser zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse bei einer einzelnen Wellenlänge, einer Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen zum Umwandeln ultrakurzer optischer Impulse in eine Vielzahl entsprechender verschiedener Wellenlängen und einem optischen Schalter zum Schalten ultrakurzer optischer Impulse von einem beliebigen einzelnen oder einer beliebigen Kombination der Wellenlängenumwandlungskanäle auf einen einzelnen Ausgabekanal.

49. Mehrfachwellenlängenultrakurzimpulsquelle nach Anspruch 48, wobei jeder der Wellenlängenumwandlungskanäle einen optischen parametrischen Erzeugungsabschnitt aufweist, der die ultrakurzen optischen Impulse parametrisch verstärkt.

Hierzu 12 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

FIG. 1

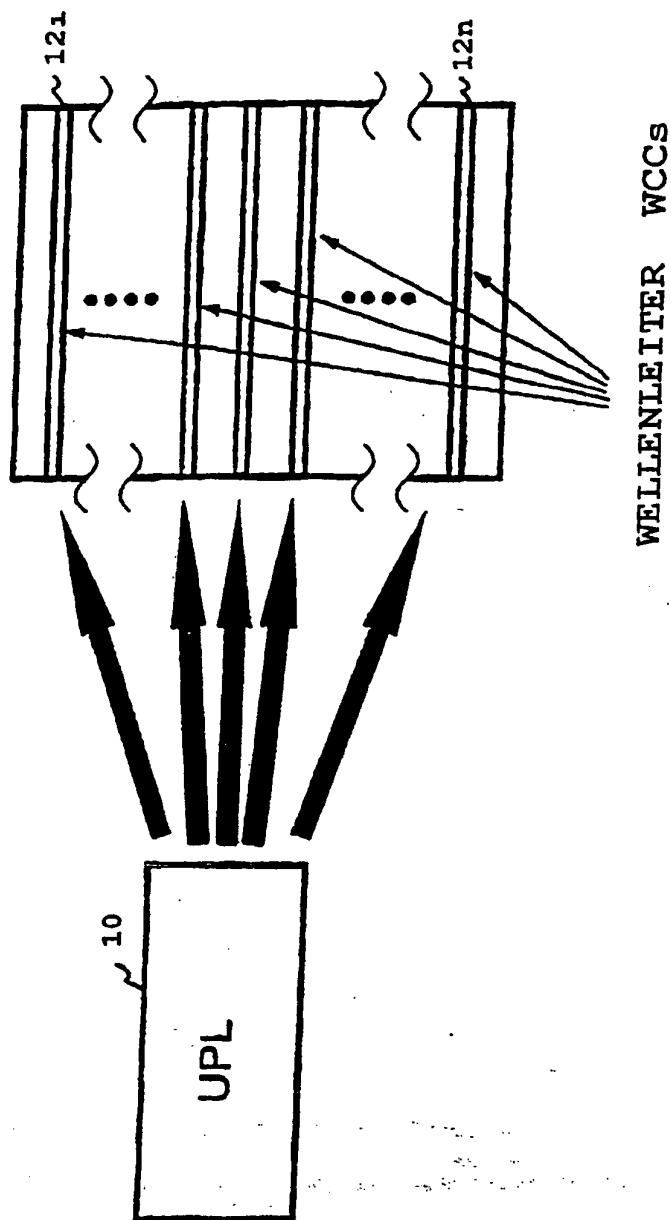


FIG. 2

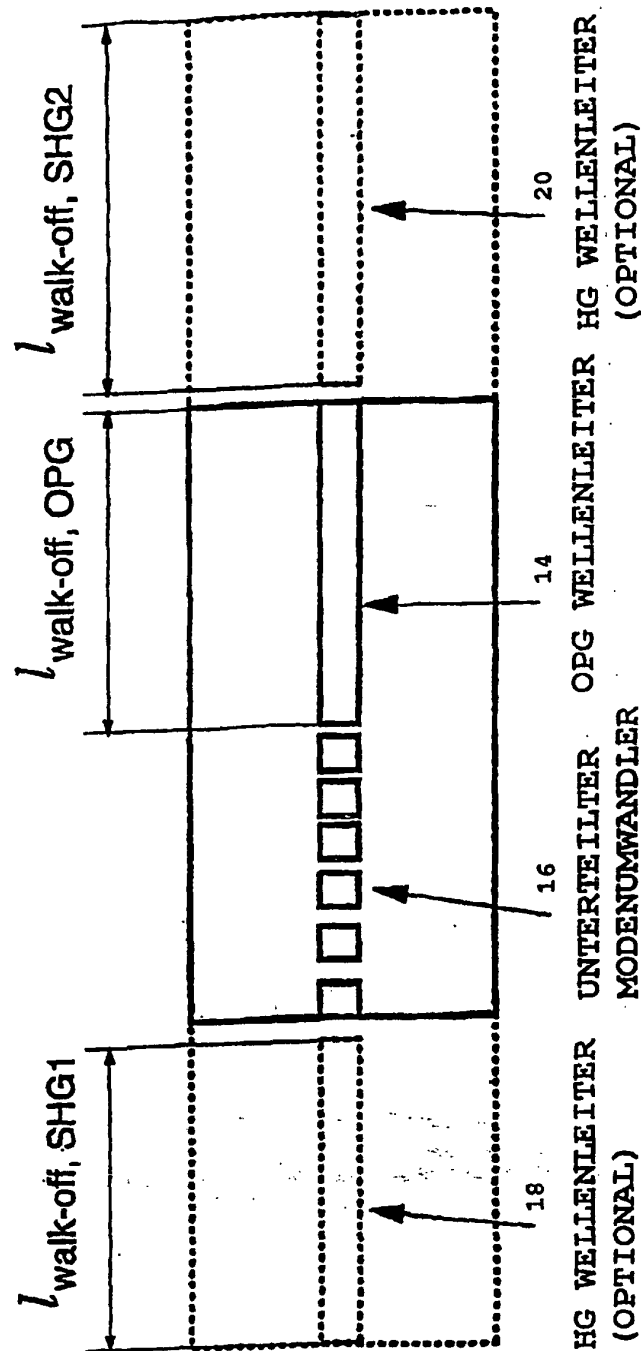


FIG. 3

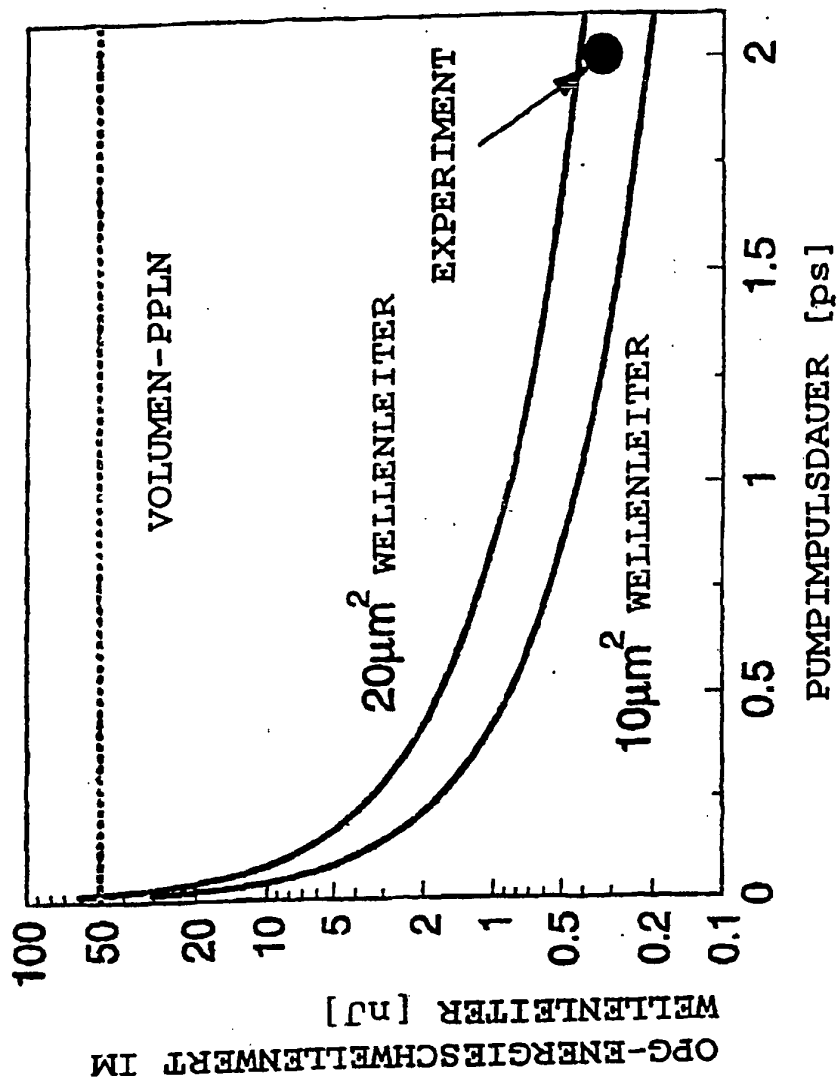


FIG. 4

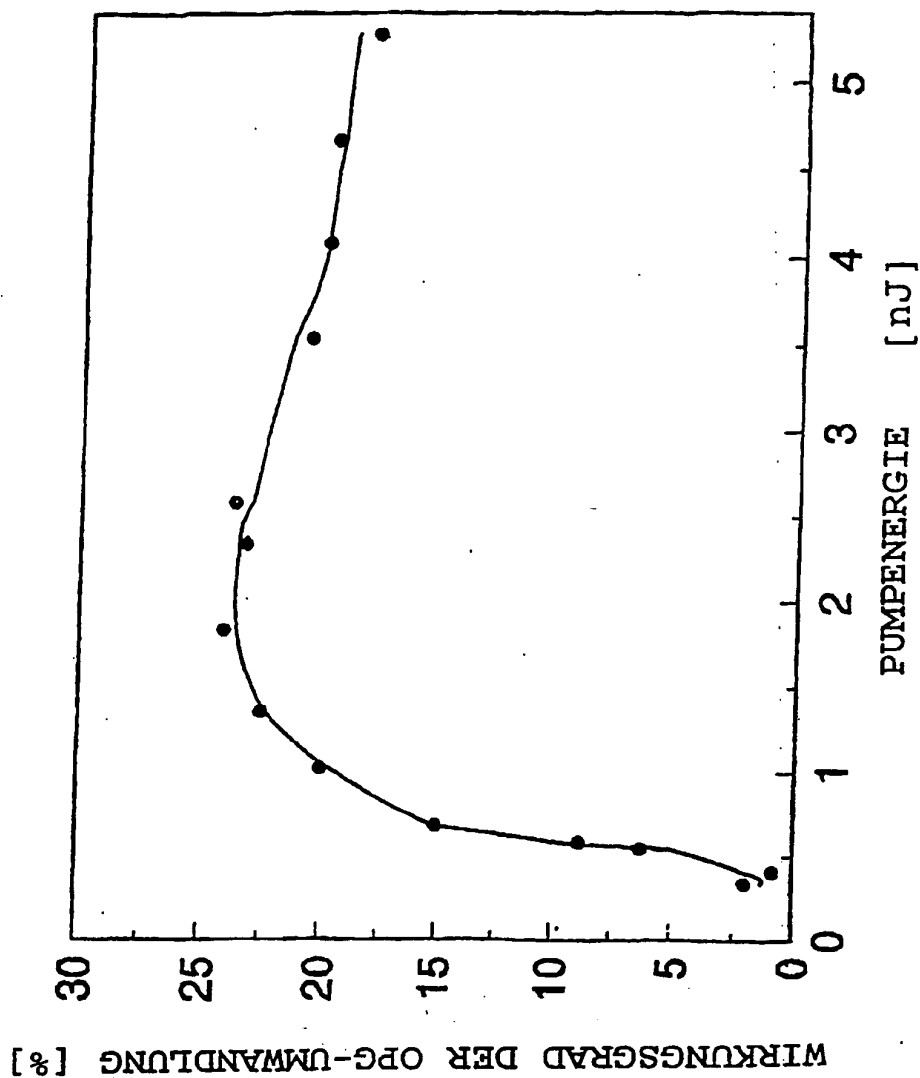


FIG. 5

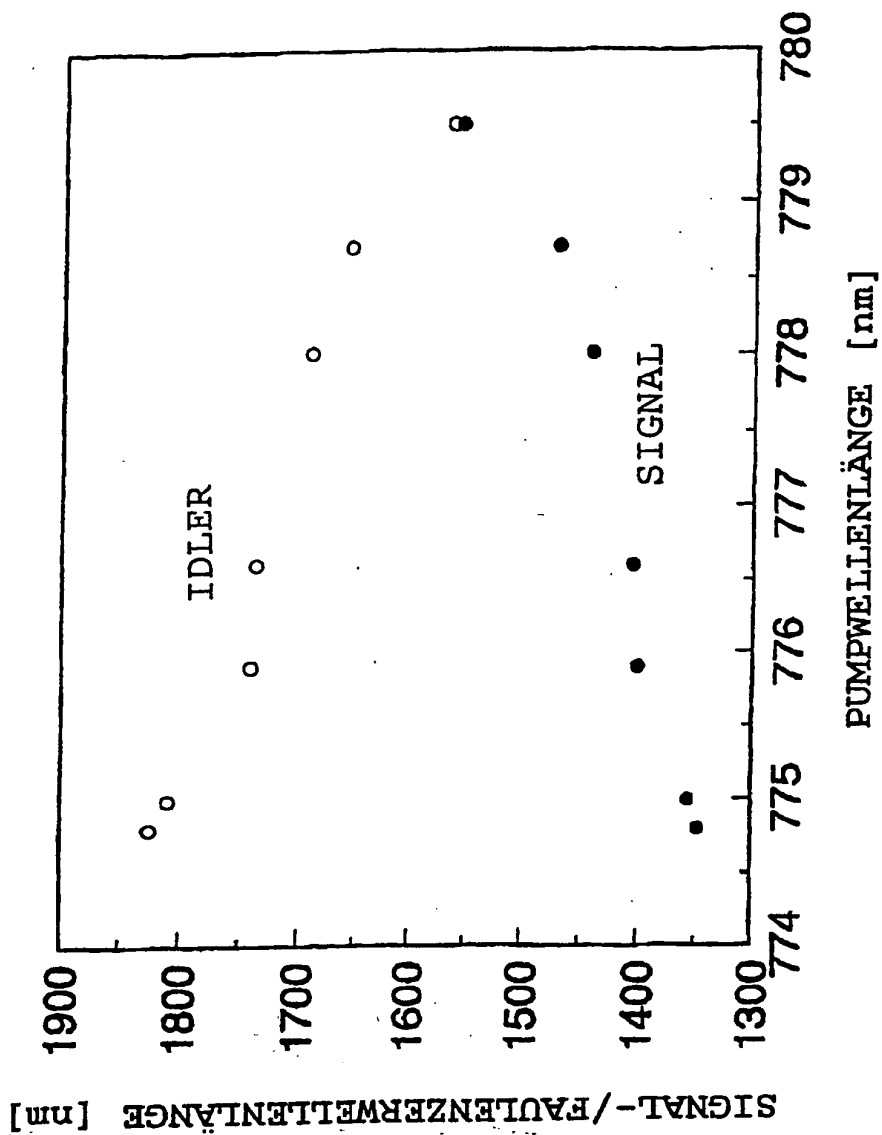


FIG. 6

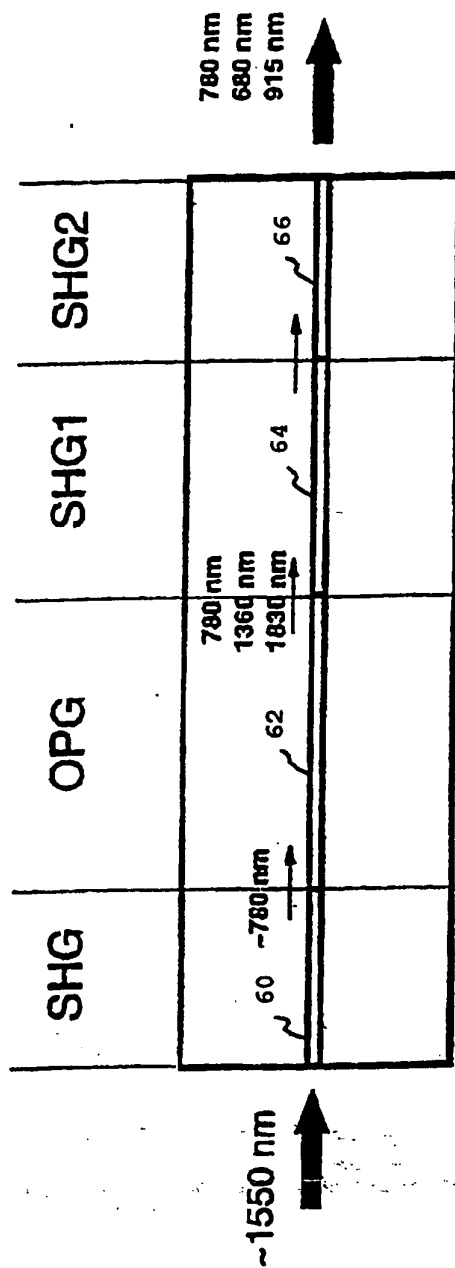
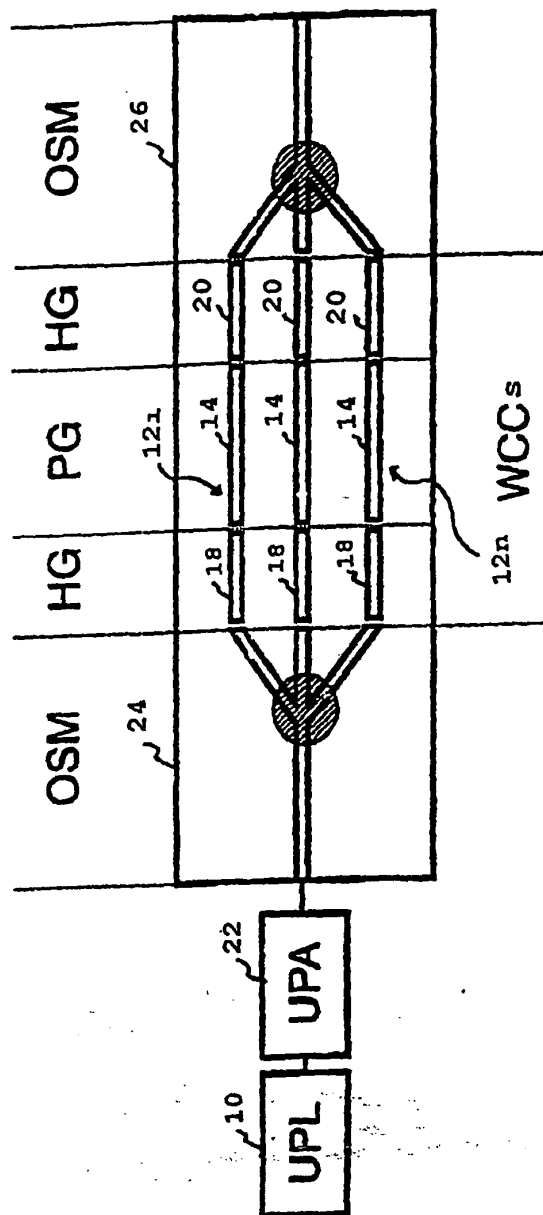


FIG. 7



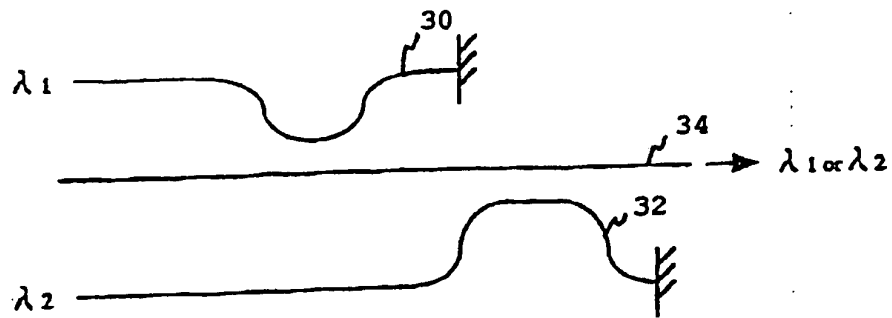


FIG. 8

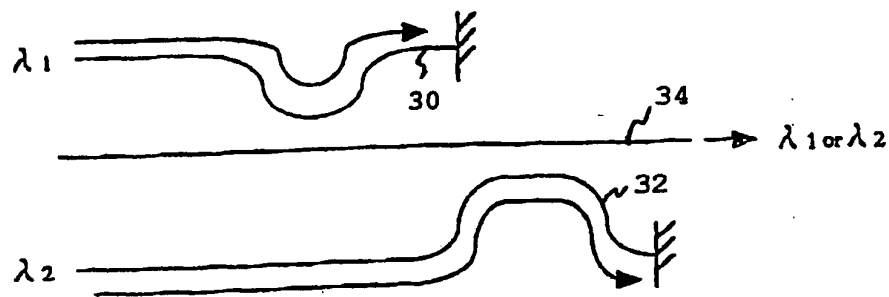


FIG. 9

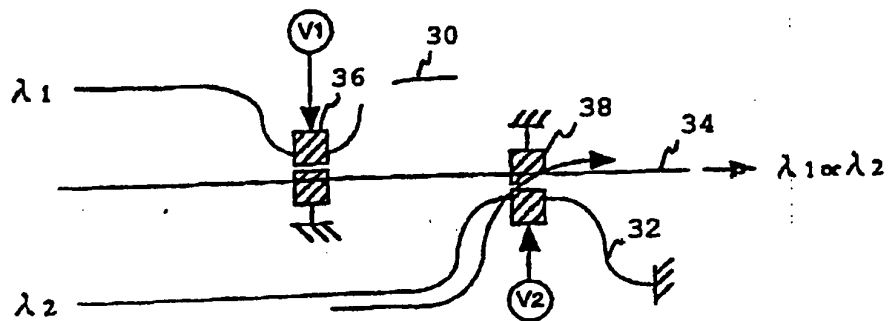


FIG. 10

FIG. 11

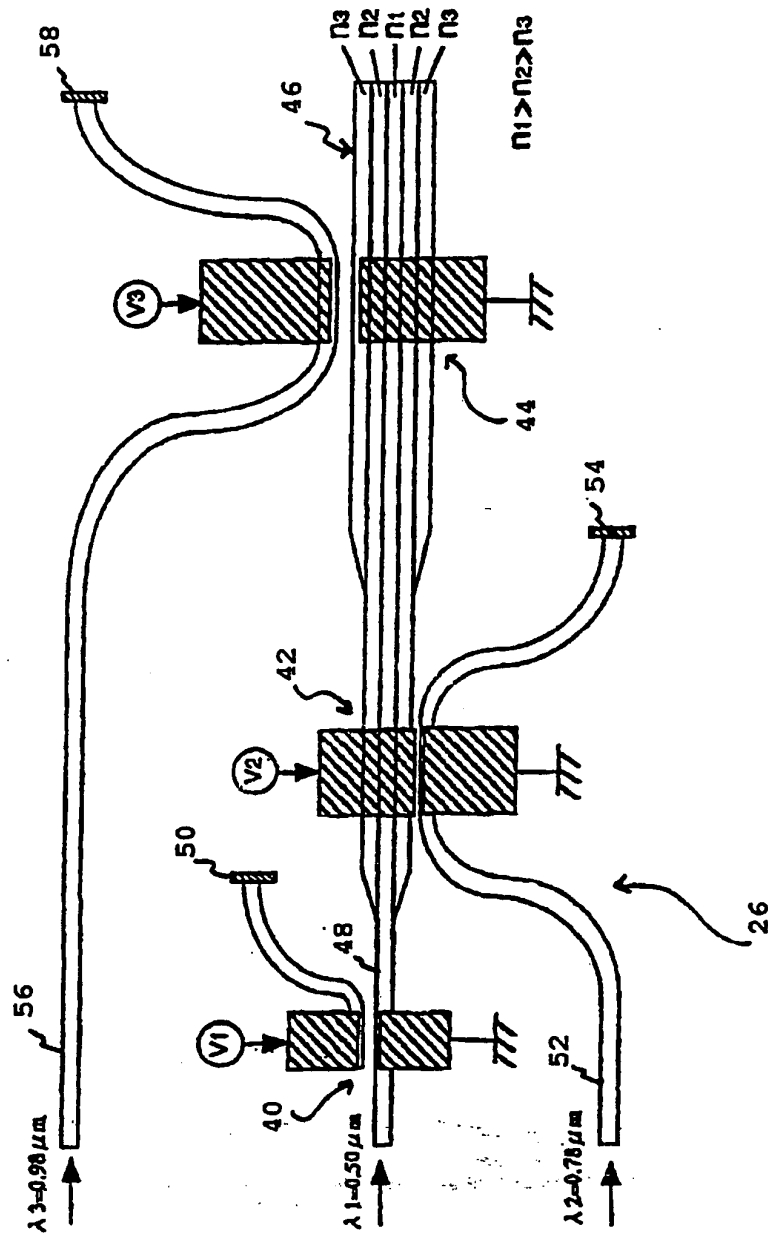
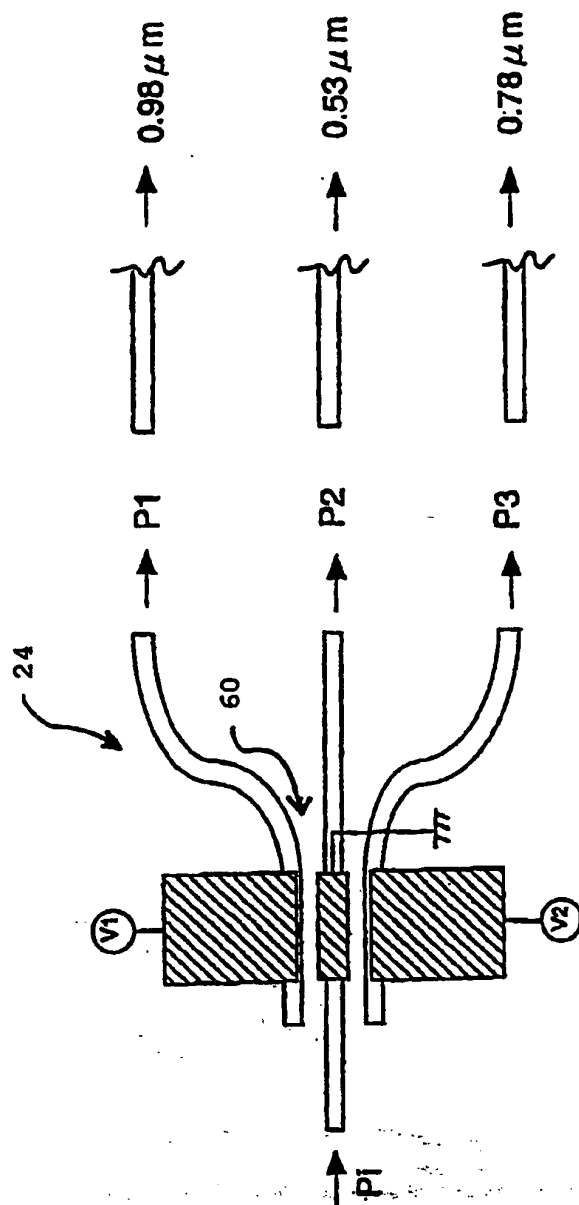


FIG. 12



P1 = P1, P2, P3

FIG. 13

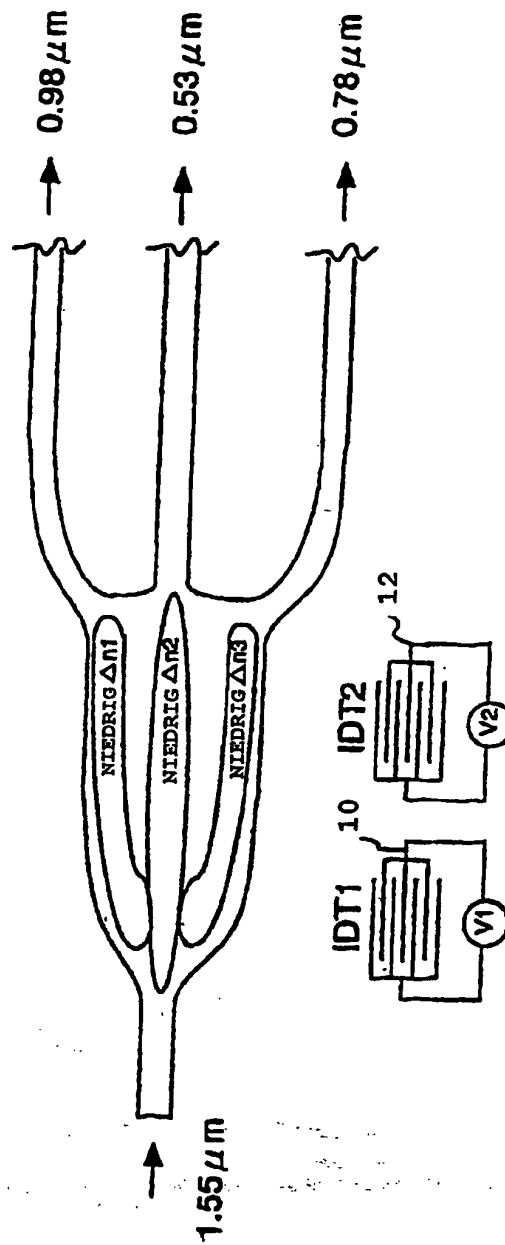


FIG. 14

